



HAL
open science

Conception, Réalisation et Caractérisation de papiers fonctionnels pour des applications de filtrage électromagnétique

Fabien De de Barros Barros

► **To cite this version:**

Fabien De de Barros Barros. Conception, Réalisation et Caractérisation de papiers fonctionnels pour des applications de filtrage électromagnétique. Autre. Université de Grenoble, 2011. Français. NNT : 2011GRENT118 . tel-01419817

HAL Id: tel-01419817

<https://theses.hal.science/tel-01419817>

Submitted on 10 Jan 2017

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

UNIVERSITÉ DE GRENOBLE

THÈSE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE GRENOBLE

Spécialité : **Optique et radiofréquence**

Arrêté ministériel : 7 août 2006

Présentée par

Fabien DE BARROS

Thèse dirigée par **Tan Phu Vuong** et
codirigée par **Pierre Lemaitre-Auger** et **Guy Eymin Petot Tourtollet**

préparée au sein des Laboratoires **IMEP-LAHC** et **LCIS** et du **Centre
Technique du Papier** dans l'École Doctorale **EEATS**

Conception, réalisation et caractérisation de papiers fonctionnels pour des applications de filtrage électromagnétique

Thèse soutenue publiquement le **19 décembre 2011**,
devant le jury composé de :

Monsieur Georges KOSSIAVAS

Professeur à l'Université de Nice, président

Madame Valérie VIGNERAS

Professeur à l'institut Polytechnique de Bordeaux, rapporteur

Monsieur Jacques DAVID

Professeur à l'Institut National Polytechnique de Toulouse, rapporteur

Monsieur Tan-Phu VUONG

Professeur à Grenoble INP, membre

Monsieur Pierre LEMAITRE-AUGER

Maître de conférences à Grenoble INP, membre

Monsieur Guy EYMIN PETOT TOURTOLLET

Ingénieur au Centre Technique du Papier, membre



Résumé

Le brouillard électromagnétique dans lequel nous vivons en permanence est aujourd'hui montré du doigt car, outre les risques sanitaires qu'il pourrait engendrer, il limite l'usage de certaines technologies. L'importance des interférences entre réseaux sans fil, ou la peur du piratage sur ces mêmes réseaux, en sont deux exemples. Ce travail de thèse vise à développer un nouveau moyen de protection contre certaines de ces ondes électromagnétiques. Plus spécifiquement, ce travail se focalise sur une technologie capable de filtrer uniquement les ondes WiFi et GSM à travers de grandes surfaces d'une habitation, comme un mur. Pour ce faire, la fonctionnalisation d'un composant standard des bâtiments, le papier-peint, a été étudié.

L'utilisation de surfaces sélectives en fréquence a été retenue. Ces motifs sont directement imprimés sur du papier à l'aide d'encre conductrice et de la technique d'impression flexographique. L'étude s'est également portée sur la réalisation de motifs de filtrage innovants. Les résultats de simulation montrent qu'ils sont capables de filtrer deux ou trois bandes, qu'ils sont quasiment insensibles à la polarisation et à l'angle d'incidence dans une plage allant de 0° à $\pm 80^\circ$. Le travail a ensuite permis de démontrer la faisabilité pratique de ce concept aux stades laboratoire et industriel. Ensuite, nous avons démontré expérimentalement l'efficacité de ce concept dans les bandes WiFi. La transmission atteint alors -30 dB. Enfin, une validation expérimentale du produit en situation réelle a été menée, à savoir la pose du papier-peint sur du plâtre, du bois, l'influence de la colle ou encore la pose d'une couche de papier-peint décoratif par-dessus le produit.

En conclusion, les résultats pratiques obtenus confirment les résultats théoriques estimés et, permettent à ce nouveau concept, appelé métapapier, d'être suffisamment efficace pour permettre la réduction des ondes WiFi ou GSM.

Mots-clés : Surface sélective en fréquence, structure périodique, filtre dichroïque bi-bande, filtre dichroïque tri-bande, polarisation, électronique imprimée, flexographie, encre conductrice, papier, papier-peint, WiFi, GSM, algorithme génétique, compatibilité électromagnétique et interférence, chambre anéchoïque

Abstract

The electromagnetic smog in which we live today is nowadays a real issue because it limits the use of certain technologies and also because there are some potential health risks associated with it, even if the latter is still a controversial subject. The importance of the interferences between wireless networks or the possibility of data hacking on the same networks are two examples. The aim of this thesis is to develop a new way to protect buildings against some of these electromagnetic waves. More specifically, this work focuses on a technology able to filter only the WiFi and the GSM waves through large areas of a home, like a wall for example. To do this, the functionalization of a standard component of buildings, the wallpaper, was studied.

The use of frequency selective surface (FSS) was chosen. These patterns are printed directly on paper with a conductive ink printing technology: the flexography. The study also focuses on the realization of innovative filter designs. Simulation results show that these novel FSS are able to filter two or three bands. They are almost insensitive to the polarization and to the angle of incidence in the range of 0° to $\pm 80^\circ$. The realization feasibility of this concept in a laboratory or in industrial conditions was demonstrated. Next, an experimental demonstration of this concept in the WiFi bands was carried out. In this context, the transmission coefficient was reached -30 dB. Finally, an experimental validation of the product in real conditions of use was conducted, namely the wallpaper was put over plasterboards or over wood panels. Also, the influence of the glue on the general performances and the placement of a decorative wallpaper over the FSS wallpaper were studied.

In conclusion, the practical results obtained confirm and validate the theoretical predictions of this new concept, called *metapaper*, and show that the practical realizations are efficient enough to allow the reduction of WiFi or GSM signals.

Keywords : Frequency selective surfaces, periodic structure, dual-band dichroic filter, tri-band dichroic filter, polarization, printed electronics, flexographic printing, conductive ink, paper, wallpaper, WiFi, GSM, genetic algorithms, electromagnetic compatibility and interference, anechoic chamber

Remerciements

Je tiens à remercier les deux laboratoires qui m'ont accueilli conjointement pour mener à bien cette thèse : le laboratoire IMEP-LAHC et le LCIS ainsi que l'entreprise pour laquelle ces recherches ont été effectuées : le Centre Technique du Papier.

Je tiens aussi à remercier mes encadrants rattachés respectivement aux trois structures citées :

Merci à Tan-Phu Vuong pour m'avoir fait confiance en me proposant ce sujet de thèse ;

Merci à Pierre Lemaitre-Auger pour son avis toujours éclairé, sa grande disponibilité et le temps investi pour les corrections de ces travaux ;

Merci à Guy Eymine Petot Tourtollet pour sa disponibilité, sa confiance et l'autonomie laissée ainsi que pour la possibilité qu'il m'a donné de participer régulièrement à d'autres projets que celui abordé dans ce manuscrit.

Merci pour votre active participation aux résultats présentés dans ce manuscrit et pour nos nombreux échanges liés ou non à cette thèse. Je vous suis sincèrement très reconnaissant de m'avoir offert cette opportunité de partager l'apprentissage de mon métier à vos côtés.

Un grand merci à Madame Valérie Vigneras (IMS, Bordeaux, UMR CNRS 5218) et à Monsieur Jacques David (Institut Fresnel, Marseille, UMR CNRS 6133) pour avoir accepté d'être les rapporteurs de ces travaux ainsi qu'à Monsieur Georges Kossivas (LEAT, Nice, UMR CNRS 6071) pour avoir accepté la présidence du Jury.

Je souhaiterais aussi vivement remercier plusieurs personnes qui, même si elles n'ont pas directement participé à mon encadrement, m'ont beaucoup apporté durant ces trois années. Il s'agit, pour le Centre Technique du Papier, d'Olivier Pras, d'Olivier Paquet, de Simon Clément, d'Anastasia Delattre ainsi que de tout l'UST10. Je les remercie notamment pour m'avoir permis de diversifier mes connaissances sur des sujets de recherche connexes, ainsi que pour leur disponibilité et leur accueil. Il s'agit pour le LCIS de Carole Seyvet et de Jhenyfer Duberville. Merci pour leur gestion irréprochable, malgré la distance, de mes différentes demandes. Il s'agit enfin pour l'IMEP-LAHC de Simon, Guillaume, Zine, Claudio, Florent et François tous doctorants du bureau 440 ainsi que Nicolas Corrao et Olivier Drouin. Merci pour m'avoir ouvert l'esprit à d'autres domaines de recherches ou à d'autres opportunités ainsi que pour votre disponibilité et votre bon-vivre.

Ces remerciements s'adressent aussi à tous les membres de mes deux laboratoires et à tous les membres du CTP que j'ai pu croisés.

Je remercie également ma famille et mes amis pour leurs encouragements et surtout Sophie pour son soutien de tous les jours et ma fille Aerith pour avoir été si facile à vivre durant ses premières années de vie.

Table des matières

RESUME.....	III
ABSTRACT	V
TABLE DES MATIERES	VII
LISTE DES TABLEAUX	XV
LISTE DES FIGURES	XVII
INTRODUCTION GENERALE.....	1
I CHOIX D'UNE TECHNOLOGIE DE FILTRAGE ELECTROMAGNETIQUES DE SURFACE.....	7
I.1 INTRODUCTION	7
I.2 CAGE DE FARADAY ET CHAMBRE ANECHOÏQUE.....	8
<i>I.2.a Introduction.....</i>	8
<i>I.2.b Cage de Faraday.....</i>	8
i Introduction	8
ii Principe de fonctionnement.....	9
iii Conclusion	13
<i>I.2.c Chambre anéchoïque.....</i>	13
i Introduction	13
ii Principe de fonctionnement.....	14
iii Conclusion	15
I.3 ECRAN DE SALISBURY	16
<i>I.3.a Introduction.....</i>	16
<i>I.3.b Principe de fonctionnement.....</i>	16
<i>I.3.c Discussion et conclusion.....</i>	21
I.4 MATERIAUX PERIODIQUES	22
<i>I.4.a Introduction.....</i>	22
<i>I.4.b Cristaux photoniques.....</i>	23
i Introduction	23
ii Equation d'onde	23
iii Cristaux photoniques à une dimension	26
iv Cristaux photoniques à deux dimensions.....	30
v Conclusion	32
<i>I.4.c Surface sélective en fréquence.....</i>	33
i Introduction	33
ii Théorie générale basée sur celle des cristaux photoniques.....	33
iii Motifs de filtrage.....	35
iv Effet du substrat	37

v	Conclusion	38
I.5	CONCLUSION ET CHOIX D'UNE TECHNOLOGIE	38
II	ETAT DE L'ART DE L'ELECTRONIQUE IMPRIMEE ET CHOIX D'UNE TECHNOLOGIE D'IMPRESSION.....	41
II.1	INTRODUCTION	41
II.2	ELECTRONIQUE IMPRIMEE	42
II.2.a	<i>Introduction</i>	42
II.2.b	<i>Electronique imprimée active</i>	43
II.2.c	<i>Electronique imprimée passive</i>	44
II.2.d	<i>Conclusion</i>	47
II.3	DESCRIPTION DES TECHNOLOGIES D'IMPRESSION.....	47
II.3.a	<i>Introduction</i>	47
II.3.b	<i>Jet d'encre</i>	48
i	Historique.....	48
ii	Description du procédé à la demande	49
iii	Avantages et inconvénients	50
iv	Conclusion sur son utilisation.....	51
II.3.c	<i>Sérigraphie</i>	51
i	Historique.....	51
ii	Description du procédé.....	52
iii	Avantages et inconvénients	52
iv	Conclusion sur son utilisation.....	53
II.3.d	<i>Offset</i>	53
i	Historique et description du procédé	53
ii	Avantages et inconvénients	55
iii	Conclusion sur son utilisation.....	55
II.3.e	<i>Fléxographie</i>	56
i	Historique.....	56
ii	Description du procédé.....	57
iii	Avantages et inconvénients à son utilisation	58
iv	Conclusion sur son utilisation.....	58
II.3.f	<i>Héliographie</i>	59
i	Historique.....	59
ii	Description du procédé.....	60
iii	Avantages et inconvénients à son utilisation	60
iv	Conclusion sur son utilisation.....	61
II.4	CONCLUSION ET CHOIX D'UNE TECHNOLOGIE D'IMPRESSION	62
II.5	SUBSTRATS POUR L'ELECTRONIQUE IMPRIMEE.....	64
II.5.a	<i>Introduction</i>	64

II.5.b	<i>Fabrication du papier</i>	64
II.5.c	<i>Le papier pour l'électronique imprimée</i>	66
II.5.d	<i>Propriétés diélectriques des matériaux cellulosiques et conclusion</i>	67
II.6	CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES.....	67
III	MODELISATION ET CREATION DE NOUVEAUX MOTIFS	71
III.1	INTRODUCTION	71
III.2	CAHIER DES CHARGES DU MOTIF IDEAL	72
III.2.a	<i>Éléments de performances</i>	72
III.2.b	<i>Insensibilité à l'angle d'incidence et à la polarisation</i>	72
III.2.c	<i>Atténuation nécessaire</i>	73
III.2.d	<i>Fréquences à filtrer et largeur de bande à rejeter</i>	75
i	Contexte	75
ii	WiFi	75
iii	Téléphonie mobile.....	76
III.2.e	<i>Synthèse</i>	79
III.3	MOTIFS EXISTANTS	80
III.3.a	<i>Revue de la littérature</i>	80
III.3.b	<i>Simulations</i>	81
III.4	CREATION DE NOUVEAUX MOTIFS PAR ALGORITHME GENETIQUE.....	86
III.4.a	<i>Présentation de l'algorithme génétique</i>	86
i	Définition.....	86
ii	Paramètres de l'AG utilisé	87
iii	Fonctions de coût	89
III.4.b	<i>Principaux résultats</i>	89
III.4.c	<i>Conclusion sur la création de motifs par algorithmes génétiques et perspectives</i>	92
III.5	RECHERCHE D'UN MOTIF APPROPRIE	92
III.5.a	<i>Motifs doubles</i>	92
III.5.b	<i>Motifs innovants</i>	96
i	Introduction	96
ii	Choix de l'élément de base	96
iii	Premières modifications de l'élément de base choisi et création du treepôle originel	97
iv	Performances du treepôle originel.....	98
v	Identification et premiers réglages des fréquences de résonnances	100
vi	Création du treepôle final	102
vii	Performances du treepôle final.....	104
viii	Conclusion et résumé des performances	107
III.6	CONCLUSION ET CHOIX DU MOTIF A UTILISER	109
IV	METHODES DE MESURE ET PREMIERS RESULTATS	111
IV.1	INTRODUCTION	111

IV.2	METHODES DE MESURE	111
IV.2.a	<i>Double chambre réverbérante</i>	111
IV.2.b	<i>Méthode issue des normes</i>	112
IV.3	BANC DE MESURE UTILISE	113
IV.3.a	<i>Principe général du banc de mesure</i>	113
IV.3.b	<i>Matériel utilisé</i>	116
IV.3.c	<i>Distances antennes-échantillon</i>	121
IV.3.d	<i>Méthodologie de mesure</i>	121
IV.3.e	<i>Limitations du banc de mesure utilisé</i>	122
i	Dynamique de mesure exploitable	122
ii	Bruit.....	124
IV.4	RESULTATS DE MESURES SUR LES SUBSTRATS EPOXY	126
IV.4.a	<i>Mesures sur substrat au format 50x50cm²</i>	126
i	Mesure du motif ETRI.....	127
ii	Répétabilité des mesures	130
iii	Mesure d'un treepôle bi-bande GSM.....	130
iv	Mesure d'un treepôle tri-bande GSM	132
v	Mesure d'un treepôle bi-bande WiFi	134
IV.5	CONCLUSIONS	136
V	OPTIMISATION DU PROCEDE FLEXOGRAPHIQUE	139
V.1	INTRODUCTION.....	139
V.2	APPAREIL FLEXOGRAPHIQUE DU CTP	139
V.2.a	<i>Présentation et caractérisation du matériel</i>	140
i	Appareil flexographique.....	140
ii	Les supports	141
iii	L'encre.....	143
iv	Les clichés.....	144
v	Mousse adhésive.....	145
vi	Images du cliché.....	146
V.2.b	<i>Principaux résultats de l'étude au stade labo</i>	147
i	Paramètres testés	147
ii	Résolution	148
iii	Epaisseur déposable et répartition d'encre	148
iv	Conductivité	152
v	Supports d'impression	154
vi	Recuit	155
vii	Dureté du cliché et pression mise en jeu	155
viii	Résumé des résultats essentiels.....	156
V.3	ESSAIS INDUSTRIELS.....	156

V.3.a	<i>Présentation des essais industriels</i>	156
V.3.b	<i>Principaux résultats des essais industriels</i>	158
V.4	CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES.....	160
VI	METAPAPIER : CONDITIONS REELLES ET EFFETS	163
VI.1	INTRODUCTION.....	163
VI.2	UTILISATION DE BANDELETTES D'EPOXY AU LIEU D'UN ECHANTILLON COMPLET.....	164
VI.2.a	<i>Introduction</i>	164
VI.2.b	<i>Présentation des situations à examiner</i>	164
VI.2.c	<i>Avec un adaptateur A3</i>	166
VI.2.d	<i>Avec un adaptateur A4</i>	167
i	Echantillon en position verticale.....	167
ii	Echantillon en position horizontale.....	169
VI.2.e	<i>Conclusion sur l'utilisation de bandelettes au lieu de substrats complets</i>	170
VI.3	UTILISATION DE PAPIER.....	170
VI.3.a	<i>Premières impressions en laboratoire</i>	171
i	Défauts rencontrés et effets possibles.....	171
ii	Mesures en fonction de la taille de l'anilox.....	173
iii	Mesures en fonction de la pression appliquée.....	176
VI.3.b	<i>Impression industrielle</i>	177
i	Essai avec impression en deux passes.....	177
ii	Essai avec anilox 30cm ³ /m ² sur la face couchée.....	178
iii	Essai avec anilox 30cm ³ /m ² sur la face non couchée.....	180
iv	Essais avec anilox de 13 et de 16cm ³ /m ²	182
v	Confirmation de la possibilité d'utiliser des bandelettes de papier.....	186
VI.4	MISE EN APPLICATION DU METAPAPIER.....	187
VI.4.a	<i>Substrats rencontrés</i>	187
i	Démarche suivie.....	189
ii	Plaque de plâtre.....	189
iii	Colle.....	192
iv	Bois.....	194
VI.4.b	<i>Superstrats</i>	196
i	Papier-peint.....	196
ii	Métapapier.....	198
VI.5	METAPAPIER EN CONDITIONS REELLES.....	200
VI.5.a	<i>Fenêtres</i>	201
VI.5.b	<i>Portes</i>	202
VI.5.c	<i>Sol et plafond</i>	203
VI.6	DEMONSTRATEUR.....	203
VI.6.a	<i>Mise en place</i>	204
VI.6.b	<i>Mesures faites</i>	205

VI.7	CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	207
	CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES.....	209
	BIBLIOGRAPHIE	215
	ANNEXE A : PRESENTATION ET CONFIGURATION DE CST MICROWAVE	227
	ANNEXE B : COURBES ANNEXES	232
	ANNEXE C : DESCRIPTION DE LA MESURE DE RESOLUTION.....	234
	PRODUCTION SCIENTIFIQUE :.....	235

Liste des tableaux

Tableau 1 : Valeur de permittivité de matériaux évoqués dans ce mémoire. (Source : [17], [18], [19], [20])	34
Tableau 2 : Formulation typique d'une encre conductrice.....	45
Tableau 3 : Tableau des principales caractéristiques des procédés d'impression précédemment évoqués. Les valeurs sont issues de [75] et [76]. Vert : attentes satisfaites; Orange : technologie limitante ; Rouge : technologie à exclure. (1) : réactualisé avec [69], (2) avec [73].	63
Tableau 4 : Note attribuée sur la base du tableau 3 à chacune des technologies.....	63
Tableau 5 : Tableau des différentes fréquences du WiFi.....	75
Tableau 6 : Tableau des différentes fréquences des téléphones portables et du WiFi (uplink = pour l'envoi des données depuis un mobile vers une station de base, downlink = pour la réception).....	77
Tableau 7 : Synthèse des bandes de fréquence à rejeter en fonction des technologies.....	80
Tableau 8 : Résumé des performances des 3 motifs figure 31.....	82
Tableau 9 : Paramètres internes de l'algorithme génétique.	89
Tableau 10 : Résumé des performances de motifs bi-bande (0.9 et 1.8GHz) obtenues à partir de deux motifs basiques imbriqués l'un dans l'autre.....	94
Tableau 11 : Résumé des performances du motif figure 38.....	95
Tableau 12 : Classement pour notre application des principaux motifs de bases existant. 1 = meilleur motif, 5 = moins bon.	96
Tableau 13 : Dimensions utilisées pour les simulations de la figure 43.....	99
Tableau 14 : Réglage des paramètres pour un fonctionnement en WiFi.....	105
Tableau 15 : Réglage des paramètres pour la figure 49 et la figure 50.....	106
Tableau 16 : Résumé des performances du treepôle final optimisé en bi-bande et tri-bande.....	108
Tableau 17 : Dimensions caractéristiques du motif treepôle bi-bande GSM réalisé sur époxy.....	130
Tableau 18 : Dimensions caractéristiques du motif treepôle tri-bande GSM réalisé sur époxy.	132
Tableau 19 : Dimensions caractéristiques du motif treepôle bi-bande WiFi réalisé sur époxy.....	134
Tableau 20 : Mesure du grammage de chaque support [146].	142
Tableau 21 : Mesure de l'épaisseur de chaque support [146].	142
Tableau 22 : Mesure de rugosité de chaque support obtenue à l'aide d'un PPS (Parker Print Surf) [146].	142
Tableau 23 : Energies de surface des différents clichés [146].	145

Tableau 24 : Epaisseurs des différents clichés et de leur relief [146].	145
Tableau 25 : Valeurs des paramètres des motifs de SSF utilisés. Les paramètres sont définis à la figure 46.	165
Tableau 26 : Correspondance du système de peignes inter-digités de la figure 143	234

Liste des figures

Figure 1: Représentation d'une réflexion à l'interface d'un diélectrique et d'un métal pour la polarisation TE.	9
Figure 2: Réflexions multiples dans un blindage.	11
Figure 3: Réflexion et absorption sur un absorbant.	15
Figure 4: Schéma de principe d'un écran de Salisbury.	16
Figure 5: Représentation d'un système multicouche illuminé par une onde plane de polarisation TE.	17
Figure 6 : représentation de cristaux photoniques à une (a), deux (b), ou trois dimensions (c).	22
Figure 7 : a: diagramme de Brillouin dans un matériau uniforme de permittivité ϵ et de périodicité fictive a ; b : diagramme de Brillouin présentant un gap photonique dû à une alternance de deux matériaux.	28
Figure 8 : Représentation du champ électrique (en noir) et de son énergie (en rouge ou violet) a : première configuration possible ; b : deuxième configuration possible [11].	29
Figure 9 : différentes mailles élémentaires dans les cristaux photoniques à 2 dimensions et leur zone de Brillouin associée ; a : maille carrée et b : maille hexagonale.	31
Figure 10 : Diagramme de bande de cristaux photoniques 2D classique. A gauche un réseau carré de cylindres diélectriques formant une bande partielle en propagation TM et à droite un réseau hexagonal de trous dans un diélectrique formant une bande complète. (Tracés issus de [11]).	32
Figure 11 : Classification des motifs issue de [21].	36
Figure 12 : Exemple de motifs simples permettant d'obtenir tous les types de filtres possibles.	36
Figure 13 : Modification de la fréquence de résonance d'une SSF lorsqu'elle est plongée entièrement dans un substrat infini ou posée sur un substrat infini.	37
Figure 14 : Route à suivre définie par l'OE-A pour l'électronique organique et les applications issues de l'électronique imprimée (photos : Konarka, Sony, [32], Avaana, OE-A, [33], Powerpaper, OE-A, Andrew Schneider's solar bikini).	43
Figure 15 : Représentation d'une encre à particules métalliques avant et après frittage.	45
Figure 16 : Evolution de la résistivité en fonction du temps et de la température de recuit traditionnellement constatée pour les encres à base de particules métalliques.	46
Figure 17 : Cycle de formation d'une goutte avec un actuateur piézoélectrique [54].	49
Figure 18 : Principales technologies jet d'encre (en vert celles primées pour l'électronique imprimée).	50
Figure 19 : Représentation classique de sérigraphie à plat (à gauche) et rotative (à droite).	52
Figure 20 : Schéma d'impression offset conventionnelle.	54

Figure 21 : En haut cylindre anilox avec les différentes alvéoles réalisables contenant l'encre, en bas cliché photopolymère pour la flexographie.....	57
Figure 22 : Représentation d'un procédé fléxographique.....	57
Figure 23 : Cylindre en cuivre gravé en creux pour l'héliogravure, comportant du texte et une illustration [70] à gauche et exemples de micro gravures réalisées dans un cylindre à droite.	59
Figure 24 : représentation d'un procédé héliographique.	60
Figure 25 : Evolution des parts de marchés des principales technologies d'impression [71].	62
Figure 26 : Schéma de principe simplifié d'une usine de papier.	65
Figure 27 : Répartition des angles d'incidence sur un mur cible en fonction du nombre de réflexions du signal incident [93].	73
Figure 28 : Réduction de la zone couverte en fonction de l'atténuation provoquée par une SSF.....	74
Figure 29 : Carte de la couverture 3G de SFR au 1er décembre 2009 soit quasiment 20ans après le lancement de la 3G en France.	76
Figure 30 : Représentation graphique des bandes des téléphones portables. Les couleurs sont les mêmes que tableau 6. BP = bande passante par rapport à la fréquence centrale de chaque double flèche.	77
Figure 31 : Représentation des motifs aux performances proches de celles recherchées. De gauche à droite : motif ETRI, motif « carré et croix » et motif Mitsubishi.	82
Figure 32 : Simulations pour les trois motifs présentés figure 31 (de gauche à droite : [34], [114], [36]). Polarisation TE en haut et TM en bas et pour chaque graphe variation de l'angle d'incidence entre 0 et 60 ou 80°.....	84
Figure 33 : Analyses des résultats précédents pour une polarisation TE, TM, pour toutes les fréquences de coupure et en fonction de la limite imposée par le cahier des charges: fréquence filtrée, atténuation et largeur de bande rejetée en fonction de l'angle d'incidence.	85
Figure 34 : Algorithme génétique utilisé.....	87
Figure 35 : Schéma d'un individu, emplacement des gènes et nombre de ceux-ci en fonction du nombre d'axes de symétrie utilisés. (a) 1 axe. (b) 2 axes. (c) 3 axes.	88
Figure 36 : Cellule élémentaire obtenue pour le cas mono-bande, juxtaposition de 9 cellules et courbes d'atténuation d'une SSF infinie pour 3 angles d'incidence : 0°, 30° et 60°. N=15, L=11mm. Durée de simulation : 6h.....	90
Figure 37 : Cellule élémentaire obtenue pour le cas bi-bande, juxtaposition de 9 cellules et courbe d'atténuation d'une SSF infinie à incidence normale. N=15, L=11mm. Durée de simulation : 4h.....	91
Figure 38 : Agencement innovant de tripôle et d'hexagone. En haut cellule élémentaire et en bas agencement de 4 cellules.	95
Figure 39 : Résultat de simulation pour le motif figure 38.....	95
Figure 40 : Exemple tiré de [127] montrant la modification de tripôle classique.	97

Figure 41 : Gauche : représentation d'un tripôle arbre à un niveau de branche et son agencement en dessous ; au milieu, tripôle arbre à deux niveaux de branche et son agencement en dessous ; à droite, tripôle arbre à un niveau de branche avec une feuille au niveau du tronc et au niveau de la branche de niveau un et son agencement en dessous.	98
Figure 42 : Principales dimensions composant un treepôle originel à un seul niveau de branche avec une feuille au tronc et aux branches de niveau un.	99
Figure 43: Premières simulations d'un treepôle originel.	99
Figure 44 : Courants de surface pour la première résonance en TE (a) et TM (b), la deuxième en TE (c) et TM (d) et la troisième en TE (e) et TM (f). Plus la couleur est rouge plus les courants sont importants, plus elle est verte moins ils le sont (obtenus à partir de CST Microwave).....	101
Figure 45 : Améliorations successives du treepôle.....	103
Figure 46 : Cellule élémentaire du motif final principalement utilisé et les paramètres qui la composent.	104
Figure 47 : Simulations TE d'un treepôle pour le WiFi.	105
Figure 48 : Simulations TM d'un treepôle pour le WiFi.	105
Figure 49 : Evolution des fréquences de résonance en fonction des paramètres B, C, D, F, G et H.	106
Figure 50 : Evolution des fréquences de résonance en fonction du paramètre A.	106
Figure 51 : Simulations de deux motifs treepôle optimisés en bi et tri-bande (gauche et droite respectivement). Polarisation TE en haut, TM en bas. Pour chaque graphe, l'angle d'incidence varie entre 0 et 80°.	108
Figure 52 : Analyses des résultats obtenus avec des treepôles finaux pour les polarisations TE et TM, pour toutes les fréquences de coupure. Les limites imposées par le cahier des charges sont aussi illustrées : fréquence filtrée, atténuation et largeur de bande rejetée en fonction de l'angle d'incidence.	109
Figure 53 : Adaptation de la norme MIL-STD-285 proposée par l'ITA PWr [137].	113
Figure 54 : Exemple d'OEM comptabilisées comme transmises alors qu'elles ne devraient pas.	114
Figure 55 : Schéma du dispositif de test utilisé.	114
Figure 56 : Rotation du panneau métallique pour mesurer l'effet de l'angle d'incidence sur l'échantillon.	115
Figure 57 : Angle d'ouverture à mi puissance en fonction de la fréquence [139].	117
Figure 58 : Schéma du banc de mesure utilisé fabriqué par la société Elcom.....	118
Figure 59 : A gauche : photographie d'un des deux pieds d'antenne fabriqué par Elcom. Un système de pivot permet de passer très simplement d'une polarisation horizontale à verticale (équivalente à TE/TM). Au milieu : photographie du banc (coté réception). 4 poutrelles de maintien assurent la robustesse du dispositif et les deux en position horizontale peuvent se déplacer suivant l'axe vertical pour assurer le maintien des échantillons. A droite : photographie du système de goupille auto bloquante pour le repérage des angles.....	118
Figure 60 : A gauche : photographie du banc coté réception une fois un échantillon positionné. A droite : photographie du banc coté émission une fois un échantillon positionné en buté contre la tôle d'aluminium.....	119

Figure 61 : A gauche : photographie du banc coté émission avec un échantillon mis en place ainsi qu'un adaptateur A3. L'échantillon est en butée contre l'adaptateur et plus contre la tôle métallique. A droite : Photographie du banc côté réception avec un échantillon mis en place ainsi qu'un adaptateur A3.	119
Figure 62 : A gauche : photographie du couloir dans lequel les manipulations ont eu lieu avant de se placer dans la chambre anéchoïque. A droite : photographie du banc avant la mise en place de l'absorbant.	119
Figure 63 : Photographie de l'ensemble des éléments du banc de mesure (excepté les câbles) une fois l'absorbant mis en place. Le panneau du banc est incliné à 20°.	120
Figure 64 : Photographie du dispositif de mesure une fois placé dans la chambre anéchoïque.	120
Figure 65 : Mesures de la transmission à travers une tôle d'aluminium d'1.5mm d'épaisseur.....	122
Figure 66 : Bruit de mesure et effet du filtrage dans le couloir et en chambre anéchoïque sur un échantillon papier.....	125
Figure 67 : Photographie des quatre échantillons fabriqués sur Epoxy.	126
Figure 68 : Géométrie et paramètres de la cellule élémentaire du motif ETRI réalisé. Figure tirée de [22].	127
Figure 69 : Comparaison générale entre mesures et simulations pour un motif ETRI.....	128
Figure 70 : Comparaison détaillée entre mesures et simulations pour un angle d'incidence de 0 et 30°.	128
Figure 71 : Comparaison détaillée entre mesures et simulations pour un angle d'incidence de 60°.	129
Figure 72 : Comparaison générale entre mesures en dehors de la chambre et simulations pour un motif treepôle bi-bande GSM....	131
Figure 73 : Comparaison détaillée entre mesures et simulations pour un angle d'incidence de 0 et 45°.	132
Figure 74 : Comparaison générale entre mesures et simulations pour un motif treepôle tri-bande GSM.	133
Figure 75 : Comparaison détaillée entre mesures et simulations pour un angle d'incidence de 0 et 45°.	134
Figure 76 : Comparaison générale entre mesures et simulations pour un motif treepôle bi-bande WiFi.	135
Figure 77 : Comparaison détaillée entre mesures et simulations pour un angle d'incidence de 0 et 45°.	136
Figure 78 : Photographie de l'appareil I-Speed Flex utilisé pour recréer une impression industrielle.....	140
Figure 79 : Vue schématique et cotation de la machine.	141
Figure 80 : Visualisation MEB de l'encre utilisée [146].	143
Figure 81 : Photographie des trois clichés utilisés.....	144
Figure 82 : Première forme test utilisée.	146
Figure 83 : Cliché utilisé pour l'impression labo de SSF (motif treepôle WiFi).	147
Figure 84 : Influence de la linéature des anilox sur l'épaisseur d'encre déposée (dureté du cliché 69°Sh, carton Decarte) [146].	149

Figure 85 : Représentation schématique du problème de coffee ring et de halo.	150
Figure 86 : Mesure de la hauteur faite avec le Topo3D sur un prototype qui a le phénomène de halo. La forme est un Y. a) Photo couleur de la hauteur, b) variations de hauteur le long du segment rectiligne AA.	151
Figure 87 : Mesure de la hauteur faite avec le Topo3D sur un prototype optimisé. La forme est un Y. a) Photo couleur de la hauteur, b) variations de hauteur le long du segment rectiligne AA.	151
Figure 88 : Influence de la vitesse d'impression sur l'épaisseur d'encre déposée (anilox 20cm ³ /m ² , carton Decarte) [146].	152
Figure 89 : Influence du volume théorique de l'anilox sur la conductivité (cliché 69°Sh, carton Decarte) [146].	153
Figure 90 : Influence de la vitesse d'impression sur la conductivité électrique (anilox de 20cm ³ /m ² , carton Decarte) [146].	153
Figure 91 : Vue d'ensemble de la machine d'impression flexographique utilisée.	157
Figure 92 : Vue d'un poste d'impression en fonctionnement à gauche et du cliché à droite.	157
Figure 93 : Exemple d'interconnexions entre motifs pour un anilox de 30cm ³ /m ²	158
Figure 94 : Photographie d'une impression sur la face non couchée d'un papier avec un anilox de 30cm ³ /m ²	159
Figure 95 : Photographie d'une impression en deux passes où un décalage existe.	159
Figure 96 : Schéma et photographie de l'assemblage des 8 bandelettes d'époxy.	164
Figure 97 : Représentation schématique des 4 configurations testées.	165
Figure 98 : Comparaison entre une mesure d'un échantillon complet avec un adaptateur A3 et 8 bandelettes d'époxy sur un adaptateur A3 normal ou réduit.	166
Figure 99 : Comparaison entre une mesure d'un échantillon complet avec un adaptateur A4 et 8 bandelettes d'époxy sur un adaptateur A4 dans le sens vertical.	168
Figure 100 : Courants de surface pour la première résonance en TE (a), TM (b) et la deuxième en TE (c) et TM (d). Plus la couleur est rouge plus les courants sont importants, plus elle est verte moins ils le sont. En noir la découpe verticale qui sera faite.	169
Figure 101 : Comparaison entre une mesure d'un échantillon complet avec un adaptateur A4 et 8 bandelettes d'époxy sur un adaptateur A4 dans le sens horizontal.	169
Figure 102 : Simulation d'un tripôle où l'épaisseur vaut à chaque fois l'épaisseur de peau.	170
Figure 103 : Photographie d'une bandelette imprimée en laboratoire et de l'assemblage de 8 d'entre elles.	171
Figure 104 : Photographie d'un assemblage propre où l'on discerne à peine la frontière entre les quatre bandelettes différentes.	172
Figure 105 : Photographie de défauts d'impressions (entourés en rouge) à droite et de l'agrandissement d'une impression due à une mauvaise régulation de la pression appliquée durant un même run à gauche.	173
Figure 106 : Mesures de l'efficacité de filtrage en fonction de la taille de l'anilox.	175
Figure 107 : Mesures de l'efficacité de filtrage d'échantillons fabriqués avec un anilox de 20cm ³ /m ² en fonction de la pression appliquée.	176

Figure 108 : Mesure de l'efficacité de filtrage d'une impression industrielle effectuée en deux passes	178
Figure 109 : Mesure de l'efficacité de filtrage d'une impression industrielle réalisée sur la face couchée avec un anilox de 30cm ³ /m ²	179
Figure 110 : Photographie d'un des nombreux écrasements présents sur l'essai réalisé avec un anilox de 30cm ³ /m ²	179
Figure 111 : Mesure de l'efficacité de filtrage d'une impression industrielle réalisée sur la face non couchée d'un papier avec un anilox de 30cm ³ /m ²	181
Figure 112 : Mesure de la hauteur faite avec le Topo3D sur la face non couchée d'un papier. La forme est un Y. a) Photo couleur de la hauteur, b) variations de hauteur le long du segment rectiligne AA.	181
Figure 113 : Comparaison des essais industriels avec un anilox de 13cm ³ /m ² et de 16cm ³ /m ² avec le meilleur résultat obtenu des essais au CTP et à la simulation.	182
Figure 114 : Photographie d'une impression en deux passes : 16cm ³ /m ² et 13cm ³ /m ²	183
Figure 115 : Photographie d'un angle droit imprimé avec un anilox de 13cm ³ /m ² à gauche et avec un anilox de 16cm ³ /m ² à droite.	183
Figure 116 : Mesure de la hauteur faite au Topo3D sur l'échantillon imprimé en deux passes (figure 114).	184
Figure 117 : Modélisation des angles droits présents dans le motif treepôle.	185
Figure 118 : Simulations d'un motif treepôle WiFi avec modification des angles comparé au motif idéal. Le surplus d'encre est de 85µm à l'intérieur et le manque est de 85µm à l'extérieur.	186
Figure 119 : Comparaison entre un échantillon complet et un échantillon constitué de bandelettes, issues des essais industriels, découpés puis réassemblés. Mesures effectuées avec un adaptateur A4.	187
Figure 120 : Photographie à la même échelle de la tranche de quatre papiers-peints différents.	189
Figure 121 : Simulation d'une SSF sur papier comparée à une SSF sur du papier et du plâtre.	190
Figure 122 : Photographies de la mise en place des échantillons sur une plaque de plâtre à l'aide d'adhésif. A gauche avant le positionnement de l'adaptateur A4 et à droite après.	190
Figure 123 : Mesures de l'efficacité de filtrage avec et sans plâtre pour quatre échantillons papier du CTP.	191
Figure 124 : Mesures de l'efficacité de filtrage avec et sans plâtre pour un échantillon industriel.	191
Figure 125 : Mesures de l'efficacité de filtrage avec et sans plâtre pour quatre échantillons collés ou scotchés.	193
Figure 126 : Mesures de l'efficacité de filtrage d'un échantillon scotché sur du plâtre puis collé sur du plâtre disposant d'une sous couche d'accroche.	194
Figure 127 : Mesures de l'efficacité de filtrage d'échantillons à base de bois.	195
Figure 128 : Mesures de l'efficacité de filtrage d'échantillons recouverts de papier-peint.	197
Figure 129 : Simulations de l'efficacité de filtrage de différents agencements de couches de métapapier.	199

Figure 130 : Mesures de deux échantillons de métapapier superposés.	199
Figure 131 : Mesures de deux échantillons de métapapier collés et séparés par 13mm de plâtre.	200
Figure 132 : Mesure de l'atténuation provoquée par un film anti UV comparée à une tôle d'aluminium.	202
Figure 133 : Photographies du sauna avant démontage.....	204
Figure 134 : Photographies de la mise en place du métapapier dans le sauna et du résultat final.	205
Figure 135 : Relevé du niveau de signal reçu dans le sauna à l'aide de Network Stumbler.....	206
Figure 136 : Exemples de maillage. De gauche à droite : hexaédrique, tétraédrique, tétraédrique courbé, PBA.....	227
Figure 137 : Eléments de CST Microwave	228
Figure 138 : Exemple de constantes d'atténuation (pour 12 modes de Floquet pris en compte) en fonction de la fréquence obtenues lors d'une simulation.....	229
Figure 139 : Transmission de puissance du mode 4 au mode de propagation principal. Z symbolise la distance entre la structure étudiée et le port de calcul.....	230
Figure 140 : Courbes obtenues par simulation illustrant les performances affichées dans le tableau 10 : a, hexagone et cercle ; b, carré et croix de Jérusalem ; c, triangle et tripôle ; d, double carré convolué ; e, croix de Jérusalem imbriquée.	232
Figure 141 : Simulations TE d'un treepôle pour le WiFi avec substrat	233
Figure 142 : Simulations TM d'un treepôle pour le WiFi avec substrat	233
Figure 143 : Système de peignes inter-digités utilisé pour la mesure de la résolution.....	234

Introduction générale

Avec le développement des appareils électroniques, de plus en plus de dispositifs émettent des ondes électromagnétiques (OEM). L'espace aurait été rapidement rendu inexploitable si certaines normes restrictives n'avaient pas été mises en place. La première d'entre elle est la directive CEM89./336/CEE exigeant deux objectifs qualitatifs :

- les perturbations générées doivent être limitées à un niveau permettant aux systèmes de radio et de télécommunication, ainsi qu'aux autres appareils, de fonctionner conformément à leur destination ;
- les appareils doivent avoir un niveau adéquat d'immunité intrinsèque contre les perturbations électromagnétiques leur permettant de fonctionner conformément à leur destination.

En revanche, contrairement aux appareils électroniques, concernant l'être humain, aujourd'hui encore, la nocivité ou non des OEM n'a pas pu être démontrée. Cette problématique fait d'ailleurs l'objet de beaucoup d'inquiétudes et donne lieu à des débats importants entre scientifiques du monde entier, le tout en présence des milliards d'euros (ou de dollars) que représentent les industries concernées... Certaines maladies liées aux OEM sont d'ailleurs reconnues et prises en charge comme n'importe quelles autres dans certains pays européens dont la France ne fait pas partie aujourd'hui. Beaucoup de personnes à travers le monde commencent à se poser des questions relatives à l'incidence des ondes sur le corps humain et, depuis qu'en 2007 le rapport « BIOINITIATIVE » prouve clairement les effets néfastes d'une surexposition aux ondes, le public est de plus en plus réceptif à cette problématique. De ce fait, certains particuliers, se basant sur le principe de précaution, sont intéressés par des moyens de protection contre les ondes. Malheureusement, les moyens existants sont difficiles à mettre en œuvre, chers ou inefficaces et filtrent toutes les ondes. Or, aujourd'hui, le problème se pose surtout pour les ondes du WiFi et du GSM. De plus, lorsque dans certains cas on bloque l'ensemble des OEM, cela peut poser des problèmes : par exemple pour des équipes de secours qui doivent communiquer à partir de l'intérieur d'un bâtiment.

La sécurisation des données est un autre domaine où les OEM doivent être contrôlées. En effet, bien que les protocoles informatiques se soient développés pour assurer la sécurité des données, le piratage a presque toujours une longueur d'avance sur

ces protections et il n'existe pas, à l'heure actuelle, de meilleure protection que l'absence physique d'OEM. Il serait donc intéressant de développer des moyens pour cloisonner certains réseaux sans fils afin de limiter les possibilités de piratage.

Un dernier aspect montrant encore l'intérêt d'un contrôle strict des OEM concerne l'encombrement des réseaux locaux sans fils. En effet, la principale technologie de communication sans fil pour les petits réseaux locaux, le WiFi, est conçue de telle sorte que seul un certain nombre de réseaux peuvent cohabiter. Ainsi, lorsque cette limite est dépassée, comme c'est par exemple presque systématiquement le cas à Paris aujourd'hui, des problèmes apparaissent. Il faut donc trouver un moyen pour cloisonner ces différents réseaux afin d'obtenir une meilleure cohabitation et ainsi faciliter la réutilisation des ressources spectrales. Cet aspect est aussi valable pour l'ensemble du spectre. Aujourd'hui, les bandes de fréquences sont considérées, au même titre que le pétrole, comme une ressource rare qui fait l'objet de beaucoup de convoitises. Des spécifications drastiques sont d'ailleurs éditées à chaque apparition de nouvelle technologie. Elles permettent d'obtenir une répartition stable des fréquences, bien qu'extrêmement dense, comme l'attestent les 250 pages que représente le tableau européen d'allocation des bandes de fréquences.

On voit donc que soit pour des aspects CEM (compatibilité électromagnétique), sanitaire, sécuritaire ou d'encombrement des réseaux, le besoin en termes de contrôle et de protection des OEM est croissant. La nécessité de développer de nouvelles technologies de blindage ou de filtrage qui s'adaptent facilement à notre environnement est donc bien réelle. Pour répondre à cette demande, le Centre Technique du Papier (CTP) s'est demandé s'il était possible de développer de nouvelles technologies sur des matériaux à base de cellulose (papier ou carton) permettant de s'incorporer facilement dans l'habitat. De plus, le papier, outre son coût relativement modeste, est une ressource recyclable qui permettrait à ce type de produit de bénéficier plus facilement d'une éco-conception.

Dans le premier chapitre de ce manuscrit, nous décrivons certaines technologies qui permettent de répondre à cette problématique de contrôle et de protection contre les OEM. Nous nous appliquons, à chaque fois, à en décrire le fonctionnement d'un point de vue mathématique. Nous étudions aussi à chaque fois la possibilité d'adapter la technologie à l'utilisation de papier comme substrat. Au final, une technologie

répondant a priori très bien à notre problématique sera choisie : les surfaces sélectives en fréquence.

Dans le deuxième chapitre, nous nous intéressons aux technologies dites d'électronique imprimée qui permettraient de fabriquer, à bas coût, des surfaces sélectives en fréquence sur papier. Ainsi, après une rapide définition de l'électronique imprimée et de ce qu'elle permet de faire, nous décrivons les différents procédés d'impression industriels couramment utilisés. Pour chacun, après un historique et une description rapide, nous présentons les avantages et inconvénients, afin de faire le choix de la meilleure technologie à utiliser. Enfin, une fois ce choix effectué, nous abordons l'utilisation du substrat papier dans l'électronique imprimée.

Dans le troisième chapitre, nous présentons la conception d'un motif de surface sélective en fréquence qui réponde à certaines spécifications. Pour cela, nous commençons par faire un rapide état des lieux des motifs existants. Ceci nous conduit à la conclusion qu'aucun motif ne correspond parfaitement à tous les critères. Nous abordons ensuite la création d'un nouveau motif plus performant que ceux existants. La première démarche tentée est de faire appel à un algorithme génétique (AG). Nous en décrivons brièvement le principe, son implantation pratique et les résultats obtenus. Ceux-ci n'étaient pas à la hauteur des performances souhaitées et nous avons changé de stratégie et avons opté pour une conception manuelle. L'intégralité de la démarche adoptée, les motifs obtenus et les performances de ceux-ci sont entièrement décrits.

Dans le quatrième chapitre, nous commencerons par présenter des possibilités de mesures existantes. Nous décrirons ensuite le banc réalisé et nous en décrirons le fonctionnement et les limitations. Puis, afin de valider le banc de test et les simulations, nous présentons des mesures faites avec des motifs de filtrage fabriqués sur époxy.

Ensuite, dans l'avant-dernier chapitre, nous présenterons les échantillons papiers réalisés à l'aide d'une machine d'impression laboratoire. Nous caractérisons les différents matériaux de ce procédé afin d'apprécier leurs effets sur les performances de l'impression réalisée. Nous voyons ainsi leur impact sur la résolution, la conductivité et le type de papier imprimable. Nous présentons ensuite les essais industriels réalisés et les résultats préliminaires obtenus.

Enfin, dans le dernier chapitre, afin de valider la possibilité de réaliser des mesures d'échantillons papiers en bandelettes, nous présentons des échantillons réalisés

sur époxy dans ce format. Nous comparons ensuite les mesures de ces échantillons aux mesures des échantillons normaux pour vérifier si le format papier laboratoire ne pose pas de problème. Nous étudions ensuite l'efficacité de filtrage des réalisations sur papier. Nous verrons ainsi, dans un premier temps à l'aide des impressions laboratoires, l'impact des principaux paramètres d'impression afin de les optimiser au mieux. Nous présentons ensuite l'efficacité de filtrage des impressions industrielles réalisées avant de conclure sur les améliorations apportées par l'industrialisation du procédé. Ensuite, nous étudions les effets sur les performances du métapapier des matériaux impliqués dans la pose de papier-peint : colle et support physique de pose : plâtre et bois ainsi que la pose d'une sur-couche de papier-peint décoratif ou de métapapier. Nous présentons ensuite les précautions à prendre pour utiliser le métapapier en conditions réelles. Enfin, nous présentons le démonstrateur réalisé et les résultats obtenus.

Nous finirons ce manuscrit par les conclusions générales et des perspectives de recherche et de développement.

I Choix d'une technologie de filtrage

électromagnétiques de surface

I.1 Introduction

Les moyens de contrôler les ondes électromagnétiques (OEM) pour qu'elles n'affectent pas nos vies ont beaucoup évolué dans le temps, il est donc important d'en faire un état des lieux afin de faire un choix éclairé pour créer un papier-peint anti-ondes.

Il faut savoir qu'il existe deux grands phénomènes permettant de se protéger des OEM ou de les contrôler :

- l'**absorption**, grâce à des matériaux absorbants ou à des dispositifs spécialisés (type écran de Salisbury) ;
- la **réflexion**, grâce aux matériaux conducteurs (formant par exemple des cages de Faraday).

Les technologies associées à l'un ou à l'autre de ces phénomènes sont généralement utilisées et développées par des groupes particuliers. Par exemple, pour les matériaux absorbants, l'armée en a été la principale utilisatrice. De ce fait, les résultats des recherches concernant ces matériaux sont difficilement transférables au grand public à cause des problématiques économiques que n'a pas forcément l'armée. Concernant les enceintes imperméables aux OEM (matériaux réfléchissants), elles sont surtout utilisées à des fins de mesures et de normes CEM. De ce fait, elles sont bien documentées, bien maîtrisées et en perpétuelles améliorations.

Nous allons donc présenter dans ce chapitre les technologies suivantes : cage de Faraday et chambre anéchoïque, l'écran de Salisbury, les cristaux photoniques et les surfaces sélectives en fréquence. Chacune d'elles est associées d'une façon ou d'une autre au contrôle des OEM. Pour chacune, nous présenterons la théorie permettant d'expliquer le contrôle des ondes. Nous concluons cette partie en faisant le choix d'une technologie qui s'adapte particulièrement bien au papier.

I.2 Cage de Faraday et chambre anéchoïque

I.2.a Introduction

Nous désirons développer un papier-peint anti-onde qui, une fois mis en application, servira à former, dans l'idéal, une cage de Faraday sélective en fréquence. Il est donc important de comprendre son fonctionnement physique. Cela nous permettra aussi d'aborder plus en détail la notion de blindage et la notion de réflexion par un matériau conducteur. En effet, ce type de protection est principalement basé sur le phénomène de réflexion.

Ensuite, pour présenter les grands principes de l'absorption, nous décrivons dans cette section le fonctionnement d'une chambre anéchoïque. Outre la présentation du principe d'absorption par des matériaux spécifiques, cette partie nous permettra de décrire l'outil de test que sont ces chambres et que nous avons utilisé pour nos mesures.

I.2.b Cage de Faraday

i Introduction

La cage de Faraday est sans doute la plus ancienne protection contre les OEM. Inventée par Faraday en 1836, elle est aujourd'hui très bien maîtrisée et elle est déclinée en de nombreux matériaux. On la rencontre dans la vie de tous les jours très régulièrement. En effet, le four à micro-onde tout comme l'avion, les ordinateurs, les voitures en sont des illustrations plus ou moins bonnes. Il s'agit d'une enceinte utilisée pour protéger des nuisances électriques ou électromagnétiques extérieures (par exemple, l'avion) ou inversement pour empêcher un appareil de polluer son environnement (par exemple le four à micro-onde). Elle est constituée de matériaux conducteurs permettant de réfléchir les OEM. Depuis quelques années, on en trouve même en tissu métallisé (développée pour des contraintes de camouflage pour l'armée). Une bonne conception mécanique est primordiale pour conserver une continuité électrique dans les coins, les portes, les joints et tout autre endroit particulier.

ii Principe de fonctionnement

Dans un premier temps, il convient de rappeler très succinctement quelques bases sur les OEM. Une onde électromagnétique plane dans un milieu homogène et isotrope est constituée d'un champ magnétique (\vec{H} en A/m), d'un champ électrique (\vec{E} en V/m) et d'une direction de propagation orthogonale à ces champs. On a donc un trièdre direct formé de \vec{E} , \vec{H} et \vec{k} qui est le vecteur d'onde représentant la direction de propagation. Pour cette raison, on parle d'une onde TEM, de l'anglais *Transverse Electric and Magnetic*. La norme de \vec{k} peut se mettre sous la forme $k = \alpha + i\beta$, où α est la constante d'atténuation et β est la constante de phase de l'onde. Sachant que nous utiliserons dans ce mémoire uniquement des ondes planes dans des milieux isotropes, le champ \vec{E} s'écrit de la manière suivante :

$$\vec{E}(r,t) = \vec{E}_0 \exp(\vec{k}\vec{r} - i\omega t) \quad (1.1)$$

où E_0 est l'amplitude du champ, ω la pulsation et \vec{k} le vecteur d'onde.

Lorsque l'onde rencontre une interface plane, il y aura une réflexion et une réfraction. Les vecteurs \vec{k} des ondes incidentes, réfléchies et transmises forment un plan nommé plan d'incidence, perpendiculaire à l'interface entre les milieux. Pour une onde dont le champ \vec{E} est perpendiculaire à ce plan d'incidence, on parle de polarisation TE. Si c'est le champ \vec{H} qui est perpendiculaire à ce plan, on parle de polarisation TM.

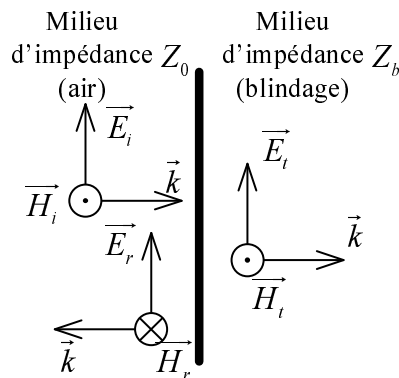


Figure 1: Représentation d'une réflexion à l'interface d'un diélectrique et d'un métal pour la polarisation TE.

Pour mieux comprendre le fonctionnement d'une cage de Faraday, il convient de modéliser les différents phénomènes existants sur et dans les parois métalliques de cette

dernière. Pour cela, la figure 1 illustre la réflexion à une interface diélectrique/métal. Les champs incidents \vec{E}_i et \vec{H}_i se déplacent dans le milieu d'impédance Z_0 . Une partie est réfléchiée, \vec{E}_r et \vec{H}_r , et l'autre partie est transmise dans le métal, \vec{E}_t et \vec{H}_t . Les premières conditions aux limites sur l'interface expriment la continuité de la composante tangentielle des champs électrique et magnétique, et les deuxièmes conditions des champs d'induction magnétique et électrique. On peut donc écrire le système d'équation (1.2) dans le cas d'une polarisation TE :

$$\begin{cases} E_i + E_r = E_t \\ H_i - H_r = H_t \end{cases} \quad (1.2)$$

Etant donné le système d'équation (1.2) on peut facilement écrire :

$$\begin{aligned} \frac{E_i}{Z_0} - \frac{E_r}{Z_0} &= \frac{E_t}{Z_b} \\ \frac{E_i}{Z_0} - \frac{E_i - E_t}{Z_0} &= \frac{E_t}{Z_b} \end{aligned} \quad (1.3)$$

où Z_0 est l'impédance du vide (ou de l'air) définie par :

$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}}, \quad (1.4)$$

et Z_b l'impédance du métal (blindage) définie par l'équation (1.15), d'où :

$$\frac{E_t}{E_i} = t = \frac{2Z_b}{Z_0 + Z_b}, \quad (1.5)$$

où t représente le coefficient de transmission en amplitude. On voit que le matériau composant la cage joue un rôle des plus importants. En effet, si le matériau est un conducteur parfait ($Z_b = 0$), il n'y aura aucun champ transmis. En réalité ce n'est jamais le cas. Le champ restant est atténué durant la traversée du matériau et est encore réfléchi à l'interface de sortie du matériau composant la cage.

Pour quantifier totalement l'atténuation provoquée par un blindage il convient donc de prendre en compte ces réflexions multiples. Pour cela, notons ρ , le coefficient de réflexion à l'interface métal/air, tel que :

$$\rho = \frac{Z_b - Z_0}{Z_b + Z_0}, \quad (1.6)$$

A chaque traversée, le champ électrique sera atténué d'un facteur $\exp(-\gamma l)$ où γ est le coefficient d'absorption dans le métal et l l'épaisseur du métal. Par souci de simplification, dans le cas d'une onde arrivant avec une incidence nulle par rapport à la normale du métal, on obtient la situation décrite sur le schéma de la figure 2.

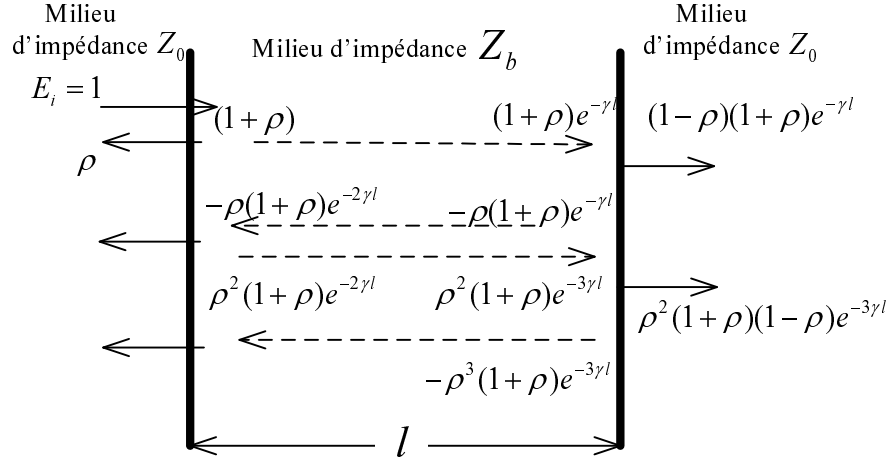


Figure 2: Réflexions multiples dans un blindage.

En sommant les différentes ondes qui passent à travers cette paroi de métal, on obtient :

$$\frac{E_t}{E_i} = \frac{H_t}{H_i} = (1 + \rho)(1 - \rho)e^{-\gamma l} (1 + \rho^2 e^{-2\gamma l} + \rho^4 e^{-4\gamma l} + \dots). \quad (1.7)$$

Le terme de droite est une série infinie qui peut se mettre sous la forme :

$$\frac{1}{1 - \rho^2 e^{-2\gamma l}} \quad (1.8)$$

puisque $\rho \leq 1$. Il concerne l'atténuation due aux réflexions multiples. L'autre terme, $(1 + \rho)(1 - \rho)$, peut se mettre sous la forme :

$$4 \frac{Z_b Z_0}{(Z_b + Z_0)^2}. \quad (1.9)$$

Il caractérise les réflexions aux interfaces. On voit que dans le cas où $Z_b \ll Z_0$, $\frac{Z_b}{Z_0}$ sera le terme prédominant de cette contribution sur l'atténuation de E_t . Au total, le coefficient de transmission est donc donné par :

$$t = \frac{E_t}{E_i} = 4 \frac{Z_b Z_0}{(Z_0 + Z_b)^2} \frac{1}{(1 - \rho^2 e^{-2\gamma l})}. \quad (1.10)$$

Ainsi plus Z_b sera faible (correspondant à un matériau fortement conducteur), meilleur sera le blindage.

Nous l'avons vu, l'absorption par le métal, permet au champ électromagnétique de décroître de façon exponentielle. L'énergie perdue est transmise au matériau sous forme de courant de Foucault et donc d'échauffement. On définit l'épaisseur de peau comme étant l'épaisseur pour laquelle le champ est atténué de $\frac{1}{e} = 37\%$ de sa valeur initiale. Physiquement, elle dépend de plusieurs caractéristiques intrinsèques au matériau :

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi\mu\sigma f}}, \quad (1.11)$$

où μ est la perméabilité du matériau, σ sa conductivité, et f la fréquence de l'onde. Elle est l'inverse du coefficient d'atténuation :

$$\delta = \frac{1}{\gamma}. \quad (1.12)$$

Finalement l'impédance d'un matériau est donnée par la relation suivante :

$$Z = \sqrt{\frac{i\omega\mu}{\sigma + i\omega\epsilon}} \quad (1.13)$$

où μ est la perméabilité du matériau, σ sa conductivité, ϵ sa permittivité et ω la pulsation de l'onde. Pour le cas d'un isolant parfait, $\sigma = 0$, on trouve la formule :

$$Z = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} = \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \cdot \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = Z_0 \cdot \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}}. \quad (1.14)$$

Dans le cas d'un conducteur, la valeur de la permittivité peut s'approximer par un imaginaire pur (voir le paragraphe 1.5) et celle de la conductivité est très élevée. On peut donc négliger la permittivité et on obtient alors la formule suivante :

$$Z \approx \sqrt{\frac{i\omega\mu}{\sigma}} = \sqrt{\frac{\omega\mu}{2\sigma}}(1+i) = \frac{(1+i)}{\sigma\delta}. \quad (1.15)$$

On voit donc que pour constituer une bonne cage de Faraday le matériau choisi est très important. Généralement on utilise de l'acier et d'autres matériaux comme du feuillard de cuivre.

Un dernier point important concernant les cages de Faraday est que l'on peut en fabriquer avec des matériaux non continus. En effet, un simple grillage peut servir de cage de Faraday si la taille des mailles par rapport à la longueur d'onde est suffisamment petite. La taille de la maille dépend des exigences désirées en termes d'atténuation mais généralement elle va de $\lambda/10$ à $\lambda/100$. Par exemple, le four à micro-onde présente un rapport supérieur à 50. Un autre exemple est la voiture, qui présente des ouvertures dont la taille n'est pas adaptée aux fréquences d'un portable, ce qui permet de téléphoner à l'intérieur, mais qui diminue la réception de la radio, d'où l'installation des antennes sur le toit ou le pare-brise.

iii Conclusion

Nous avons décrit le principe de base de la réflexion d'une onde à l'aide d'un métal. Nous avons donc vu qu'une onde traversant un matériau métallique subira une forte atténuation. Enfin, nous avons vu mathématiquement pourquoi l'atténuation provoquée par un matériau augmente lorsque sa résistivité diminue. Nous savons donc que des matériaux comme le cuivre, l'argent ou l'aluminium permettraient d'obtenir de bonnes performances tandis que le carbone par exemple ne permettrait pas d'atteindre de haut niveau d'atténuation. Nous pourrions donc recouvrir notre papier d'un feuillet métallique afin de réfléchir les ondes. Malheureusement, outre les difficultés techniques de cela, le coût serait probablement important et toutes les fréquences seraient atténuées ce qui n'est pas forcément un bien étant donné que seules certaines technologies sont visées.

I.2.c Chambre anéchoïque

i Introduction

Les cages de Faraday permettent d'empêcher une OEM de sortir ou de rentrer dans une enceinte. Cependant, lorsqu'il s'agit de tests, on aimerait que le champ émis à l'intérieur de la cage ne revienne pas perturber les mesures (phénomènes d'échos). Pour cela, on utilise des chambres anéchoïques qui absorbent le rayonnement électromagnétique lorsqu'il arrive au niveau des parois constituant ces chambres. En réalité, il s'agit d'une cage de Faraday dont les murs intérieurs sont tapissés d'une

mousse absorbant les OEM. Il est donc intéressant d'étudier cette « tapisserie » de mousse afin de voir si la technologie utilisée ne pourrait pas être compatible avec du papier.

ii Principe de fonctionnement

Les premières chambres anéchoïques ont vu le jour pendant la deuxième guerre mondiale et elles ne concernaient alors que le domaine sonore en vue de réduire le bruit dans les véhicules de combat. Les cages de Faraday électromagnétiques ont vu le jour en 1953 et sont aujourd'hui très utilisées dans tous les domaines électroniques (aérospatial, automobile, etc.) pour de nombreux tests et la vérification des normes électromagnétiques. Il en existe de toutes tailles selon les fréquences mises en jeu et les appareils à tester. En effet, en général les mesures se font en champ lointain afin que les ondes puissent être considérées comme planes. Donc, avec une antenne de 50cm de circonférence à 900MHz, il faudra se placer à $2D^2/\lambda = 1.5m$, ce qui représente, pour un dispositif d'émission réception, une distance déjà importante (3m).

Etant donné la définition du coefficient de réflexion vue dans la section précédente, on sait que pour que ce coefficient soit nul, il faut que $Z_0 = Z_b$. Or, comme l'impédance est en partie fonction de la fréquence, la difficulté qui se présente est de maintenir ce résultat sur une très large bande de fréquence. Cela justifie en partie les formes pyramidales des mousses (que l'on peut trouver sous d'autres formes), car elles servent de transitions adiabatiques afin d'adapter l'impédance de l'OEM à l'impédance du matériau constituant la mousse. Cependant, cela ne fonctionne que pour une certaine plage de fréquences. En effet, cela ne fonctionne qu'avec les fréquences dont la longueur d'onde correspond à peu près à la taille des cônes. Par exemple si les pics font environ 30 à 50 cm de haut, il s'agit donc de fréquences assez hautes. En réalité, lorsque dans ce cas on descend en fréquence (1GHz environ), l'épaisseur de peau augmente (voir équation (1.11)) et, les épaisseurs de matériaux deviennent trop importantes. D'autres méthodes de blindage, notamment à base de ferrite pour le champ magnétique, doivent alors être utilisées mais ceci ne sera pas vu dans le cadre de ces travaux.

L'autre justification de la forme pyramidale des matériaux absorbants concerne les plus hautes fréquences. A haute fréquence, le schéma de la figure 3 est alors valable. Les OEM de petites longueurs d'ondes (hautes fréquences) vont donc être emprisonnés

dans les cônes et être atténuées à l'intérieur du matériau. Ce dernier est constitué de telle sorte à obtenir une dissipation maximale de l'énergie. Il est généralement constitué de carbone et de différents alliages gardés secrets par chaque fabricant. Le carbone est un matériau suffisamment conducteur pour que les particules réagissent et dissipent donc une partie de l'énergie en chaleur, mais pas trop pour limiter les réflexions. Il est aussi très peu coûteux contrairement aux ferrites. De plus, si l'onde n'était pas suffisamment atténuée en arrivant sur le talon de l'absorbant, celle-ci refera le trajet inverse après réflexion. Ceci garantit une absorption maximale.

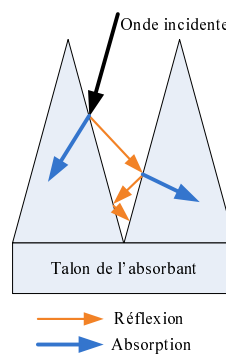


Figure 3: Réflexion et absorption sur un absorbant.

iii Conclusion

Concernant l'utilisation de matériaux absorbants avec le papier, on comprend que de nombreuses limitations et difficultés existent. En effet, la première d'entre elles est que la formation de cônes n'est pas réaliste dans nos espaces de vie. Nous devrions également nous attendre à une largeur de bande d'absorption limitée. L'utilisation de carbone avec le papier est tout à fait possible mais limiterait beaucoup les performances. De plus, les matériaux à base de ferrite, lorsqu'ils sont performants, sont extrêmement coûteux et leur utilisation ne concorde pas avec l'idée du CTP de développer un matériau peu coûteux et facile d'utilisation. Enfin, l'épaisseur des matériaux absorbants actuels ne correspond pas avec celle d'un papier-peint.

I.3 Ecran de Salisbury

I.3.a Introduction

Il existe d'autres moyens d'absorber les ondes sans utiliser de matériaux absorbants. L'un d'entre eux repose sur les écrans de Salisbury. Nous allons donc présenter cette technologie et la théorie mathématique permettant de bien comprendre son fonctionnement. Ces écrans sont principalement utilisés par l'armée dans le but de concevoir des véhicules militaires dont le SER (*surface équivalente radar*) est la plus faible possible. Cette quantité, exprimée en mètre carré, exprime la taille d'une cible telle qu'elle est perçue par un radar. Elle dépend principalement de la fréquence, de la forme de l'objet et des matériaux le constituant. A titre de comparaison, grâce à des techniques de conception adaptées, la SER d'un bombardier peut être de 1 à 2 m² tandis que pour un avion civil de mêmes dimensions, elle est de 50 m². Cependant, comme une bonne conception ne suffit pas à elle seule à obtenir des objets furtifs car il y a toujours des ondes réfléchies, l'armée a développé d'autres technologies dont les écrans de Salisbury.

I.3.b Principe de fonctionnement

Le but est d'absorber complètement les OEM et ce, sans utiliser d'absorbants qui ont une forte épaisseur et/ou un poids important. Le schéma de principe d'un tel absorbeur est donné à la figure 4.

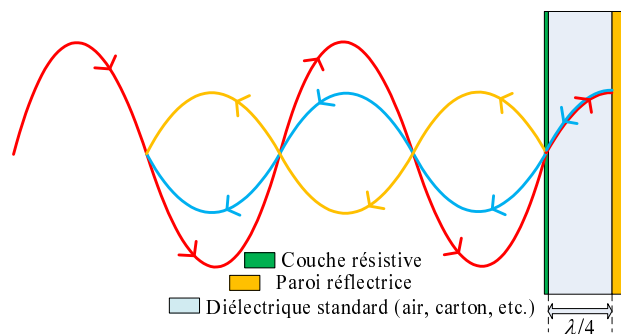


Figure 4: Schéma de principe d'un écran de Salisbury.

Sur ce schéma on trouve 3 ondes différentes. La première (en rouge) est l'onde incidente. Elle rencontre la couche dite résistive. L'onde se décompose alors en une

onde réfléchie (onde orange) qui est déphasée de 180° et atténuée et en une onde transmise. Une fois arrivée au plan réflecteur, cette onde est réfléchie et est déphasée de 180° avant de repartir dans l'autre sens (onde bleue). Les deux ondes réfléchies (orange et bleue) vont pouvoir interférer de façon destructive pour une certaine valeur d'épaisseur de diélectrique. Par exemple, si l'épaisseur de diélectrique est de $\lambda/4$, le déphasage provoqué par un aller retour est de 180° et les ondes seront en opposition de phase. L'onde résultante sera donc nulle à condition que les amplitudes des deux ondes réfléchies soient les mêmes.

Pour cela, il existe une condition sur la couche dite résistive. Cependant, comme cet écran est composé de trois couches de matériaux différents, pour bien comprendre cette condition, il faut aborder la modélisation des matériaux multicouches. Nous utiliserons le schéma de principe de la figure 5 dans lequel une onde plane incidente se situe dans l'air et rencontre notre milieu 1.

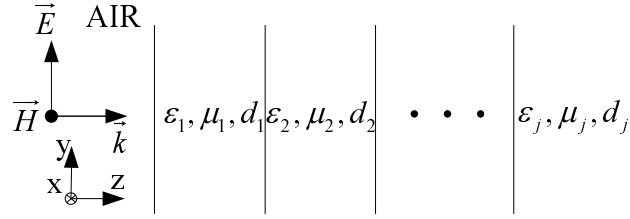


Figure 5: Représentation d'un système multicouche illuminé par une onde plane de polarisation TE.

On définit chaque couche par sa permittivité, ϵ_j , sa perméabilité, μ_j , et son épaisseur, d_j . On utilisera des ondes planes telles que $\vec{H} = (H_x; 0; 0)$ et $\vec{E} = (0; E_y; 0)$ qui se déplacent suivant z . On est donc en polarisation TE.

On a vu à la section I.2.b qu'à chaque interface une réflexion et une transmission avaient lieu. En se basant sur cette idée, on décompose les champs électrique et magnétique dans chaque milieu en une somme d'ondes réfléchies, E^- et incidentes, E^+ . On peut donc écrire à n'importe quel endroit dans la j -ème couche :

$$\begin{cases} E_{yj} = E_j^+ e^{-ik_j(z-z_j)} + E_j^- e^{ik_j(z-z_j)} \\ H_{xj} = \frac{1}{Z_j} (E_j^- e^{ik_j(z-z_j)} - E_j^+ e^{-ik_j(z-z_j)}) \end{cases}, \quad (1.16)$$

où $e^{-ik_j(z-z_j)}$ représente le déplacement de l'onde dans le j -ème milieu sur une distance $z - z_j$ avec k_j donné par :

$$k_j = \omega \sqrt{\epsilon_0 \epsilon_j \mu_0 \mu_j}. \quad (1.17)$$

En $z = z_j$, soit à l'interface entre la couche j et $j+1$:

$$\begin{cases} E_{yj} = E_j^+ + E_j^- \\ H_{xj} = \frac{1}{Z_j} (E_j^- - E_j^+) \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} E_j^+ = \frac{1}{2} (E_{yj} - Z_j H_{xj}) \\ E_j^- = \frac{1}{2} (E_{yj} + Z_j H_{xj}) \end{cases}. \quad (1.18)$$

En $z = z_{j-1}$, soit à l'interface entre la couche j et $j-1$, étant donné que les composantes tangentielles des champs \vec{E} et \vec{H} sont continues aux interfaces, on peut dire que $H_{xj} = H_{x(j-1)}$ et $E_{yj} = E_{y(j-1)}$, d'où :

$$\begin{cases} E_{y(j-1)} = E_j^+ e^{ik_j d_j} + E_j^- e^{-ik_j d_j} \\ H_{x(j-1)} = \frac{1}{Z_j} (E_j^- e^{-ik_j d_j} - E_j^+ e^{ik_j d_j}) \end{cases} \quad (1.19)$$

où $d_j = z_j - z_{j-1}$. Ainsi grâce à l'équation (1.16), on obtient :

$$\begin{aligned} E_{y(j-1)} &= \frac{1}{2} (E_{yj} - Z_j H_{xj}) e^{ik_j d_j} + \frac{1}{2} (E_{yj} + Z_j H_{xj}) e^{-ik_j d_j} \\ \Leftrightarrow E_{y(j-1)} &= E_{yj} \left(\frac{e^{ik_j d_j} + e^{-ik_j d_j}}{2} \right) - Z_j H_{xj} \left(\frac{e^{ik_j d_j} - e^{-ik_j d_j}}{2} \right). \\ \Leftrightarrow E_{y(j-1)} &= E_{yj} \cos(k_j d_j) - i Z_j H_{xj} \sin(k_j d_j) \end{aligned} \quad (1.20)$$

De la même façon, pour le champ magnétique, on obtient :

$$H_{x(j-1)} = H_{xj} \cos(k_j d_j) - i \frac{E_{yj}}{Z_j} \sin(k_j d_j). \quad (1.21)$$

On peut donc, grâce à ces équations, passer d'un milieu à l'autre. Pour cela, la notation matricielle est très utile :

$$\begin{bmatrix} E_{y(j-1)} \\ H_{x(j-1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(k_j d_j) & -i Z_j \sin(k_j d_j) \\ \frac{-i}{Z_j} \sin(k_j d_j) & \cos(k_j d_j) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{yj} \\ H_{xj} \end{bmatrix}. \quad (1.22)$$

Ces équations sont issues de conditions de continuités aux interfaces. Donc grâce à l'hypothèse simplificatrice que l'amplitude des champs est constante dans les milieux j , la relation (1.22) peut se mettre sous une forme plus générale pour N milieux :

$$\begin{bmatrix} E_{y1} \\ H_{x1} \end{bmatrix} = \prod_{j=2}^N M_j \begin{bmatrix} E_{y(N+1)} \\ H_{x(N+1)} \end{bmatrix}, \quad (1.23)$$

avec M_j la matrice de transfert de l'interface $j-1$ à j .

Dans le cas particulier d'un milieu à trois couches, nous avons :

$$\begin{bmatrix} E_1 \\ H_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_3 \\ H_3 \end{bmatrix}, \quad (1.24)$$

où

$$\begin{aligned} \alpha_{11} &= \cos(k_2 d_2) = \alpha_{22} \\ \alpha_{12} &= -iZ_2 \sin(k_2 d_2) \\ \alpha_{21} &= \frac{-i}{Z_2} \sin(k_2 d_2) \end{aligned} \quad (1.25)$$

Le problème est que même si on est capable de passer d'un milieu à un autre, il arrive qu'on ne connaisse pas les champs de départ ou d'arrivée. Lorsque c'est le cas, on utilise le fait que le rapport E/H est constant et vaut Z . On utilise donc la notion d'impédance ramenée à un plan donné, ici l'interface entre l'espace libre et le milieu 1, que l'on notera \hat{Z}_j . Il s'agit de l'impédance d'entrée effective entre l'espace libre et le milieu $j-1$. \hat{Z}_1 est donc l'impédance d'entrée effective à l'interface entre l'espace libre et le milieu 1 telle que :

$$\begin{aligned} \hat{Z}_1 &= \frac{E_1}{H_1} = \frac{\alpha_{11}E_3 + \alpha_{12}H_3}{\alpha_{21}E_3 + \alpha_{22}H_3} = \frac{\alpha_{11}Z_3 + \alpha_{12}}{\alpha_{21}Z_3 + \alpha_{22}} \\ \hat{Z}_1 &= \frac{Z_3 \cos(k_2 d_2) - iZ_2 \sin(k_2 d_2)}{-i \frac{Z_3}{Z_2} \sin(k_2 d_2) + \cos(k_2 d_2)} = Z_2 \frac{Z_3 - iZ_2 \tan(k_2 d_2)}{Z_2 - iZ_3 \tan(k_2 d_2)}. \end{aligned} \quad (1.26)$$

Pour l'écran de Salisbury, le milieu 1 est le milieu résistif, le diélectrique le 2, et le 3 est le milieu réflecteur que l'on suppose parfait d'où :

$$\hat{Z}_1 = Z_2 \frac{Z_3 - iZ_2 \tan(k_2 d_2)}{Z_2 - iZ_3 \tan(k_2 d_2)} = -iZ_2 \tan(k_2 d_2) \quad (1.27)$$

car Z_3 vaut 0. Ces expressions peuvent encore se simplifier dans un cas particulier. En effet, dans le cas où le diélectrique (2) est de l'air et d_2 vaut $\lambda/4$ on a :

$$\tan(k_2 d_2) = \tan(\omega \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0} \frac{\lambda}{4}) \quad (1.28)$$

qui représente une valeur infinie car :

$$\tan(\omega \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0} \frac{\lambda}{4}) = \tan(\frac{2\pi c}{\lambda} \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0} \frac{\lambda}{4}) = \tan(\frac{\pi}{2} \frac{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}}) = \infty. \quad (1.29)$$

c étant la vitesse de la lumière dans le vide. Cela permet de simplifier l'expression (1.27) en :

$$\hat{Z}_1 = \frac{iZ_1}{\tan(k_1 d_1)}. \quad (1.30)$$

Ainsi, en reprenant l'expression (1.30), on se rend compte que si $d \ll \lambda$ alors $\tan(kd) \approx kd$ d'où :

$$\hat{Z}_1 = \frac{iZ_1}{\tan(k_1 d_1)} \approx \frac{iZ_1}{k_1 d_1} \approx \frac{i \sqrt{\frac{\mu_1}{\varepsilon_1}}}{d_1 \omega \sqrt{\mu_1 \varepsilon_1}} \approx \frac{i}{d_1 \omega \varepsilon_1}. \quad (1.31)$$

Or la couche (1) est résistive ce qui veut dire qu'une définition complexe de la permittivité doit être mise en place. Le détail sera donné dans la partie I.4.c mais on trouve que :

$$\varepsilon_1 \approx \frac{i\sigma_1}{\omega}. \quad (1.32)$$

où σ_1 est la conductivité du milieu 1. Sachant que l'on veut que le matériau équivalent à l'écran de Salisbury ne présente aucune réflexion, donc, dans le cas idéal, que toute l'énergie soit dissipée dans le milieu résistif, on a :

$$\rho = \frac{\hat{Z}_1 - Z_0}{\hat{Z}_1 + Z_0} = 0 \Leftrightarrow \hat{Z}_1 = Z_0. \quad (1.33)$$

En effet, un écran de Salisbury n'est qu'un blindage, dont le fonctionnement a été décrit en I.2.b, sur lequel on rajoute des couches pour absorber les ondes. Ainsi, dans le cas réel, une partie de l'énergie peut être transmise et bien évidemment, en raison des

approximations faites, une partie de l'énergie sera aussi réfléchi. Quoiqu'il en soit on se retrouve donc avec les conditions suivantes :

$$\begin{cases} \hat{Z}_1 \approx \frac{1}{d_1 \sigma_1} = Z_0 \\ d_2 = \frac{\lambda}{4} \end{cases} \quad (1.34)$$

Ainsi, à l'aide de matériaux composites dont on maîtrise la conductivité, on sera capable de remplir ces conditions et de former un écran absorbant. Le but premier de ces écrans étant militaire, on a toujours cherché à diminuer l'épaisseur totale de l'écran ou à augmenter les bandes rejetées. Ainsi, beaucoup d'améliorations ont été apportées à l'idée principale de Salisbury comme les écrans de Jaumann [1] et de Dällenbach [2].

I.3.c Discussion et conclusion

Ces écrans sont donc de puissants outils pour se protéger des OEM mais présentent une limitation lorsque l'on veut absorber plusieurs fréquences. Concernant l'épaisseur de ces technologies, bien que certains développements aient été faits notamment à l'aide de surfaces sélectives en fréquence (SSF) [3] ou de métamatériaux [4], leur utilisation avec une feuille de papier seule reste impossible. Il conviendrait cependant d'examiner leur intérêt en les combinant à certains matériaux du bâtiment comme des plaques de plâtre. En effet, Kiani et al. rapporte une épaisseur d'environ $\lambda/6$ [3]. Or, dans le cas de l'utilisation de plâtre, en raison de sa permittivité (d'environ 2.5), cette épaisseur pourrait être diminuée jusqu'à $\lambda/15$ environ. Cette dernière tomberait alors entre deux standards d'épaisseur de plaque de plâtre (BA6 et BA13). Une voie à explorer pourrait donc être le cas d'un écran de Salisbury contenu dans une plaque de plâtre et absorbant les ondes WiFi. Elle aurait pour avantage, au regard d'autres technologies basées sur la réflexion, d'absorber les ondes plutôt que de les rediriger ailleurs, réduisant ainsi le brouillard électromagnétique ambiant au lieu de simplement tenter de le confiner dans une enceinte. Malheureusement, bien que cette idée soit prometteuse, nous n'aurons pas l'occasion de l'aborder durant nos travaux.

I.4 Matériaux périodiques

I.4.a Introduction

Il existe de nombreux matériaux périodiques. Leur nom peut être cristaux photoniques, structures à bandes interdites électromagnétiques (BIE), structures à bandes interdites photoniques (BIP), surfaces sélectives en fréquence, etc. Ce sont des matériaux composés d'un arrangement périodique à une, deux, ou trois dimensions d'un diélectrique (figure 6) ou d'un métal. Ils présentent tous la propriété de posséder une bande de fréquence dans laquelle la propagation des ondes y est interdite. L'onde est ainsi réfléchie à une fréquence définie en fonction des caractéristiques physiques du matériau.

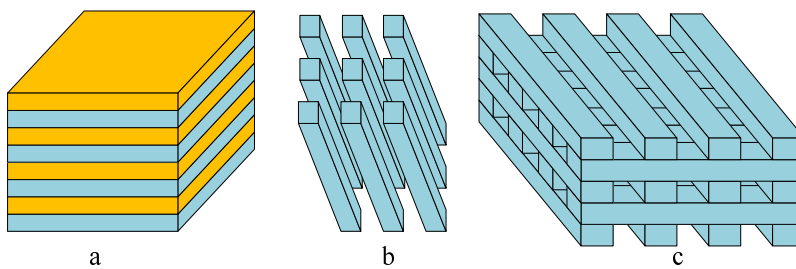


Figure 6 : représentation de cristaux photoniques à une (a), deux (b), ou trois dimensions (c).

D'après la figure 6, il faudrait donc pouvoir, dans l'épaisseur ou à la surface du papier, créer une alternance de matériaux. Bien que ceci soit réalisable, la nature des diélectriques ne permet pas d'atteindre les gammes de fréquences micro-ondes que nous visons en maintenant des dimensions conformes à notre application qui doivent être du même ordre de grandeur que la plus grande longueur d'onde étudiée soit 33cm dans notre cas [5]. Ces technologies, à base de diélectriques (cristaux photoniques, BIE ou BIP), sont en effet plus adaptées à un fonctionnement dans une gamme optique. Ainsi, nous ne pourrions utiliser ces matériaux pour notre application. En revanche, l'utilisation de métal permet un fonctionnement aux fréquences micro-ondes et les équations qui régissent le fonctionnement de structures périodiques métalliques sont les mêmes, à une ou deux simplifications près, que celles pour les diélectriques. Or, la compréhension physique du phénomène de création de bande interdite est plus simple à comprendre à l'aide des cristaux photoniques. Ainsi, nous établirons la théorie mathématique de base pour les cristaux photoniques. Nous verrons ensuite quelles sont les modifications à

apporter à cette théorie, dans le cas 2D, lorsque l'on utilise du métal. Ces structures sont alors appelées surfaces sélectives en fréquence (SSF) et sont, comme nous le verrons, celles qui paraissent le mieux adaptées à notre application.

I.4.b Cristaux photoniques

i Introduction

La principale caractéristique des cristaux photoniques, qui leur a donné le nom de cristaux, provient de leur analogie avec des matériaux présentant naturellement un arrangement périodique des molécules les composant (les cristaux justement). En effet, certains de ces cristaux naturels (les semi-conducteurs ou autres [6] [7]) présentent une bande d'énergie dans laquelle les électrons ne peuvent pas se situer. Il en va de même pour les cristaux photoniques dans lesquels il existe une bande de fréquences pour laquelle la propagation des photons ou des OEM est interdite.

C'est en 1887 que Lord Rayleigh a montré qu'une telle bande interdite existait dans un matériau. Ce n'est que plus tard qu'il sera appelé cristal photonique. Cependant, leur évolution n'a réellement démarré qu'en 1915, avec la théorie associée au miroir de Bragg (figure 6a), qui n'est autre qu'un cristal photonique à une dimension. Ce n'est qu'encore plus tard que l'on s'est intéressé à ces matériaux aux fréquences micro-ondes [8] [9].

Nous allons décrire en détails le fonctionnement et la théorie mathématique associée à ces structures à une dimension, dans laquelle la polarisation des ondes n'a donc pas d'influence, puis, nous étendrons succinctement la théorie à deux dimensions.

ii Equation d'onde

Pour bien comprendre le fonctionnement d'un miroir de Bragg formé d'une alternance de matériaux diélectriques différents, ou d'un cristal photonique à une dimension (figure 6a), deux explications sont possibles.

La première consiste à poser le problème comme nous l'avons défini pour l'écran de Salisbury et de faire en sorte que tous les rayons réfléchis repartent en phase

et interfèrent de façon constructive, contrairement à l'écran de Salisbury. On arrive alors à obtenir un matériau fortement réfléchissant en respectant les conditions suivantes :

- chaque couche à une longueur électrique de $\lambda/4$;
- le nombre de couches doit être impair ;
- la première couche rencontrée par l'OEM doit être celle d'indice de réfraction $n = \sqrt{\epsilon}$ le plus élevé.

On comprend que le miroir de Bragg ne pourra donc fonctionner qu'à une longueur d'onde bien spécifique et pour une incidence normale.

Une deuxième façon est de calculer et de visualiser graphiquement le diagramme de Brillouin. Ce diagramme, ainsi que la théorie mathématique sur laquelle il repose vient de l'analogie avec les semi-conducteurs [10]. Pour bien comprendre, il faut repartir des équations de Maxwell :

$$\begin{cases} \vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 & \vec{\nabla} \wedge \vec{E} + \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = \vec{0} \\ \vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho & \vec{\nabla} \wedge \vec{H} - \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = \vec{J} \end{cases}, \quad (1.35)$$

où \vec{B} est l'induction magnétique, \vec{D} le déplacement électrique, ρ la densité de charge, \vec{J} la densité de courant, $\vec{\nabla}$. l'opérateur *gradient* et $\vec{\nabla} \wedge$ l'opérateur *rotationnel*. Dans le cas des cristaux photoniques, certaines hypothèses peuvent être formulées :

- milieux homogènes ne variant pas dans le temps où il n'y a pas de charges libres ou de courant (la lumière s'y propage mais il n'y a pas de source dans le milieu) $\Rightarrow |\vec{J}| = \rho = 0$. Nous sommes donc en présence de diélectriques et non de métaux (le cas des métaux sera abordé en I.5) ;
- la dépendance fréquentielle de ϵ et de μ est ignorée et on utilisera des matériaux non magnétiques donc $\epsilon(\vec{r}, \omega) = \epsilon_0 \epsilon(\vec{r})$ et $\mu(\vec{r}, \omega) = \mu_0$.

Cela conduit donc à l'écriture suivante :

$$\begin{cases} \vec{\nabla} \cdot \vec{H}(\vec{r}, t) = 0 & \vec{\nabla} \wedge \vec{E}(\vec{r}, t) + \mu_0 \frac{\partial \vec{H}(\vec{r}, t)}{\partial t} = \vec{0} \\ \vec{\nabla} \cdot (\epsilon(\vec{r}) \cdot \vec{E}(\vec{r}, t)) = 0 & \vec{\nabla} \wedge \vec{H}(\vec{r}, t) - \epsilon_0 \epsilon(\vec{r}) \frac{\partial \vec{E}(\vec{r}, t)}{\partial t} = \vec{0} \end{cases}. \quad (1.36)$$

Toujours par souci de simplification, les matériaux sont considérés sans pertes et $\vec{E}(\vec{r})$ et $\vec{H}(\vec{r})$ sont des ondes planes. De plus, les équations de Maxwell étant linéaires, on peut séparer les dépendances temporelle et spatiale et donc écrire une forme bien connue de solutions :

$$\begin{cases} \vec{H}(\vec{r}, t) = \vec{H}(\vec{r})e^{-i\omega t} \\ \vec{E}(\vec{r}, t) = \vec{E}(\vec{r})e^{-i\omega t} \end{cases} \text{ et } \begin{cases} \vec{H}(\vec{r}) = \vec{H}_0 e^{i\vec{k}\vec{r}} \\ \vec{E}(\vec{r}) = \vec{E}_0 e^{i\vec{k}\vec{r}} \end{cases} . \quad (1.37)$$

On insère (1.37) dans (1.36) et nous obtenons :

$$\begin{cases} \vec{\nabla} \cdot \vec{H}(\vec{r}) = 0 & \vec{\nabla} \wedge \vec{E}(\vec{r}) - i\omega\mu_0 \vec{H}(\vec{r}) = \vec{0} \\ \vec{\nabla} \cdot (\varepsilon(\vec{r})\vec{E}(\vec{r})) = 0 & \vec{\nabla} \wedge \vec{H}(\vec{r}) + i\omega\varepsilon_0 \varepsilon(\vec{r})\vec{E}(\vec{r}) = \vec{0} \end{cases} . \quad (1.38)$$

Les deux premières équations nous disent que $\vec{k} \cdot \vec{H}_0 = 0$. Les deux autres peuvent se réécrire sous la forme suivante :

$$\vec{\nabla} \wedge \left(\frac{1}{\varepsilon(\vec{r})} \vec{\nabla} \wedge \vec{H}(\vec{r}) \right) = \left(\frac{\omega}{c} \right)^2 \vec{H}(\vec{r}), \quad (1.39)$$

où c est la vitesse de la lumière dans le vide. La formulation en \vec{H} est plus simple à exploiter mathématiquement que celle en \vec{E} pour des raisons que nous allons voir.

Le but est donc de résoudre l'équation (1.39) pour un $\varepsilon(\vec{r})$ donné pour obtenir les modes de propagation $\vec{H}(\vec{r})$, ainsi que les fréquences correspondantes. Puis, nous utiliserons à nouveau (1.38) pour repasser au champ électrique. Pour faire la résolution de l'équation (1.39), nous pourrions utiliser des méthodes classiques de résolution : méthode des ondes planes, des matrices de transfert ou FDTD (*Finite Difference in Time Domain*). Cependant, avec ces différentes méthodes, il est difficile de voir physiquement ce qui se passe. Nous utiliserons donc le fait que l'opérateur Θ défini par :

$$\Theta(\bullet) = \vec{\nabla} \wedge \left(\frac{1}{\varepsilon(\vec{r})} \vec{\nabla} \wedge (\bullet) \right) \quad (1.40)$$

soit « hermitien » [11]. Il commute avec les opérateurs de symétrie de translation correspondant à la périodicité du système (tout opérateur qui correspond à une propriété mesurable est hermitien et tous les vecteurs propres peuvent être orthogonaux). Les valeurs propres de cet opérateur sont réelles et on peut réécrire (1.39) :

$$\Theta(\vec{H}(\vec{r})) = \left(\frac{\omega}{c}\right)^2 \vec{H}(\vec{r}) \quad (1.41)$$

La formulation en \vec{E} ne permet pas cette facilité, d'où la préférence pour une écriture en \vec{H} .

Une fois la forme des solutions mise en évidence dans le cas d'un matériau périodique à l'aide du théorème de Bloch-Floquet, afin de visualiser physiquement la raison de la création d'un gap photonique, nous utiliserons le fait que, sommairement, un mode à tendance à concentrer l'énergie de son champ électrique dans la région de plus forte constante diélectrique, tout en maintenant son orthogonalité par rapport aux modes de fréquences inférieures. Ce constat peut être obtenu par l'approche dite « variationnelle » et l'utilisation du quotient de Rayleigh [11].

iii Cristaux photoniques à une dimension

Dans le cas de matériaux périodiques à une dimension, où l'onde incidente se propage à la normale du plan formé par la structure, la permittivité peut s'écrire :

$$\varepsilon(\vec{r}) = \varepsilon(\vec{r} + na\vec{u}_p), \quad (1.42)$$

où n est un entier, a le pas du réseau périodique et \vec{u}_p le vecteur unitaire représentant la direction de la périodicité. Le fait que l'on utilise un opérateur hermitien et que la permittivité soit périodique nous permet d'utiliser le théorème de Bloch-Floquet. Il nous dit que, pour des problèmes périodiques de ce type, les solutions peuvent être choisies de la forme :

$$\vec{H}(\vec{r}) = \vec{H}_{(\vec{k},n)}(\vec{r}) = e^{i\vec{k}\vec{r}} u_{(\vec{k},n)}(\vec{r}), \quad (1.43)$$

où $u_{(\vec{k},n)}(\vec{r})$ est une série périodique de Fourier. L'équation (1.39) peut alors se réécrire :

$$(\vec{\nabla} + i\vec{k}) \wedge \frac{1}{\varepsilon(\vec{r})} (\vec{\nabla} + i\vec{k}) \wedge u_{\vec{k}}(\vec{r}) = \left(\frac{\omega_n(k)}{c}\right)^2 u_{(\vec{k},n)}(\vec{r}) \quad (1.44)$$

où $\omega_n(k)$ est la pulsation du champ $\vec{H}_{(\vec{k},n)}(\vec{r})$. Il nous faut donc résoudre cette équation aux valeurs propres afin de trouver les valeurs des $\omega_n(k)$ et $u_{(\vec{k},n)}(\vec{r})$.

Dans le cas d'un matériau homogène, $\vec{\varepsilon}(\vec{r}) = cste$, les modes auront la forme :

$$\vec{H}_{\vec{k}}(\vec{r}) = \vec{H}_0 e^{i\vec{k}\vec{r}}, \quad (1.45)$$

et seront solution de l'équation (1.39) avec la valeur propre

$$\left(\frac{\omega}{c}\right)^2 = \frac{k^2}{\varepsilon}. \quad (1.46)$$

Ce constat nous conduit donc à la relation de dispersion bien connue :

$$\omega = \frac{ck}{\sqrt{\varepsilon}}. \quad (1.47)$$

Cette équation donne l'évolution de la fréquence en fonction de la norme du vecteur d'onde. Dans le cas d'un milieu dispersif ε dépendrait de f mais nous l'avons exclu par hypothèse.

Considérons le cas d'une alternance de deux matériaux identiques, donc équivalent à une barre de diélectrique homogène unidimensionnel, auquel on assigne une périodicité fictive a (voir figure 6a avec $\varepsilon_{jaune} = \varepsilon_{bleu}$). On a alors :

$$\vec{k} = \vec{k} + \frac{2\pi n}{a} \vec{u}_p, \quad (1.48)$$

d'où :

$$\omega_n(k) = \omega_n\left(k + \frac{2\pi n}{a}\right). \quad (1.49)$$

La relation de dispersion obtenue de la même façon que pour l'équation (1.47) est alors :

$$\omega_n(k) = \frac{c\left(k + \frac{2\pi n}{a}\right)}{\sqrt{\varepsilon}}. \quad (1.50)$$

On voit que pour chaque valeur de k , positive ou négative, il pourra exister une infinité d'ondes, de fréquence différente, qui peuvent se propager dans la structure. Le diagramme de bande, ou diagramme de Brillouin est issu de la relation (1.50). Il présente sur un domaine d'étude restreint, $k \in \left[-\frac{\pi}{a}; \frac{\pi}{a}\right]$, l'évolution de la fréquence en fonction de k . On observe sur ce diagramme (figure 7a) les différentes courbes $\omega_n(k)$.

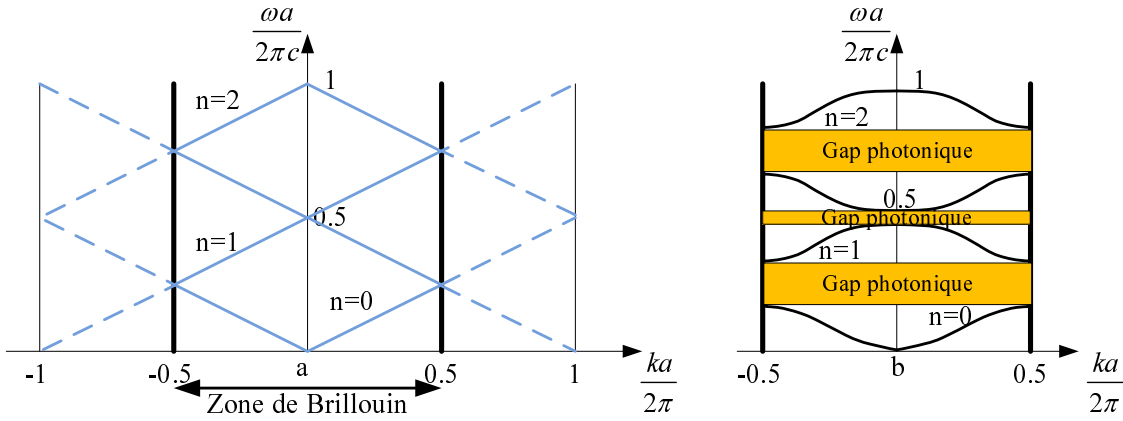


Figure 7 : a : diagramme de Brillouin dans un matériau uniforme de permittivité 4 et de périodicité fictive a ; b : diagramme de Brillouin présentant un gap photonique dû à une alternance de deux matériaux.

Intéressons-nous maintenant à l'apparition des bandes interdites ou gap. En effet, dans le cas étudié jusqu'ici, l'alternance de matériaux était fictive car nous étudions le cas d'une alternance de matériaux identiques, d'où l'absence de bande interdite sur la figure 7a. En revanche, la figure 7b, où l'apparition de gaps photoniques est visible, correspond à l'alternance de deux matériaux de permittivité différente (figure 6a) où chaque couche a une épaisseur différente. Le schéma a été réalisé avec des valeurs particulières : $\varepsilon_1 = 16$, $\varepsilon_2 = 4$, $d_1 = 0.25a$, $d_2 = 0.5a$ où d_1 et d_2 sont respectivement les épaisseurs des matériaux de la première et de la deuxième couche. Afin de donner rapidement la fréquence centrale de la première bande interdite, on peut reprendre la définition issue de l'étude d'un miroir de Bragg : la longueur électrique d'une couche doit être égale à $\lambda/4$, soit :

$$d_1\sqrt{\varepsilon_1} + d_2\sqrt{\varepsilon_2} = \frac{\lambda}{2} = \frac{\pi c}{\omega}. \quad (1.51)$$

On peut donc rapidement déduire à quelle fréquence est le premier gap, soit

$$\frac{\omega a}{2\pi c} \simeq 0.25 \text{ dans notre cas.}$$

Tentons maintenant de justifier physiquement l'apparition de bandes interdites.

Pour cela, plaçons-nous au point $k = \frac{\pi}{a}$ sur le diagramme de Brillouin, ce qui correspond à des modes de longueur d'onde $2a$. Dans ce cas, en utilisant l'équation (1.50), on voit qu'il existe une infinité de solutions doubles en fonction de n . Considérons la première

solution double. Dans le cas de la figure 7a, cela correspondrait à l'intersection entre les droites

$$\omega = \frac{ck}{\sqrt{\epsilon}} \quad (1.52)$$

et

$$\omega = \frac{-ck + \frac{2\pi}{a}}{\sqrt{\epsilon}}, \quad (1.53)$$

Dans ce cas, étant donné la symétrie de la structure, seules deux configurations sont possibles pour la représentation du champ électrique. En effet, les modes de basse fréquence concentrent l'énergie de leur champ électrique dans la région de plus forte constante diélectrique et les modes de haute fréquence ont une plus grande partie de leur énergie répartie dans les zones à faible constante diélectrique. Ainsi, ces deux configurations peuvent se représenter grâce à la figure 8a et la figure 8b. En effet, soit le ventre du champ électrique se situe dans une zone à forte permittivité (cas a) soit l'inverse (cas b).

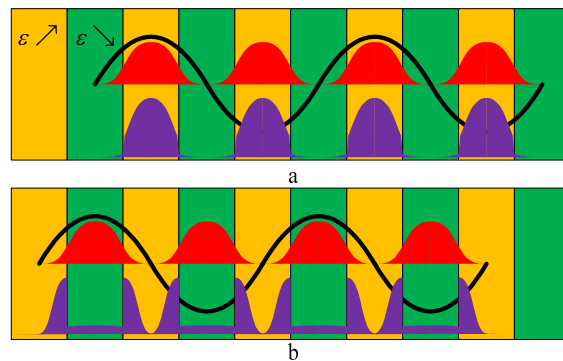


Figure 8 : Représentation du champ électrique (en noir) et de son énergie (en rouge ou violet) a : première configuration possible ; b : deuxième configuration possible [11].

Deux cas sont représentés pour l'énergie du champ électrique à chaque fois :

- celui en rouge où la différence de permittivité entre les zones oranges (forte permittivité) et les zones vertes (faible permittivité) est faible (typiquement 1) ;
- celui en violet où la différence de permittivité entre les zones vertes et orange est importante (typiquement supérieure à 10).

L'effet est quasi inexistant mais, dans le cas en rouge de la figure 8a, si l'on considère les zones oranges comme étant à forte permittivité, la plus grande partie de

l'énergie du mode est concentrée dans une zone à forte permittivité conduisant à diminuer sa fréquence [11][12]. Le cas en violet illustre mieux ce phénomène de concentration d'énergie et se traduit par un mode dont la fréquence va diminuer encore plus dans le cas de la figure 8a. En effet, une très grande partie de son énergie est concentrée dans une zone de forte permittivité, de la même façon que sur la figure 8b où le changement de la répartition d'énergie est nettement plus marqué.

Au final, étant donné que le mode *au-dessus* du gap voit sa fréquence augmenter et le mode *en-dessous* du gap voit la sienne diminuer, une bande de fréquence dans laquelle aucun mode de propagation ne pourra prendre place va apparaître entre ces deux modes de propagation autorisés. On parlera alors de gap photonique ou de bande interdite de propagation.

Concernant la taille de ce gap, certaines formules approchées existent dans le cas où la variation de permittivité est faible ($\frac{\Delta\epsilon}{\epsilon} \ll 1$). Dans le cas où l'épaisseur de chaque lame de diélectrique vaut $\lambda/4$, des formules exactes se ramenant à un miroir de Bragg existent. Dans un cas quelconque, comme celui de la figure 7b, seule une résolution numérique permettrait d'obtenir la largeur de la bande.

iv Cristaux photoniques à deux dimensions

Jusqu'ici nous n'avons traité que des structures à une dimension où la polarisation de l'onde n'avait pas d'impact sur le résultat et où l'onde se propageait à la normale du plan formé par nos structures. Nous allons, dans le cas à deux dimensions, continuer à utiliser une onde incidente dont l'angle d'incidence est nul par rapport à la normale du plan formé par nos structures. Contrairement au cristal photonique à 1D, dans un cristal photonique à 2D, la polarisation de l'onde va avoir une influence forte. Il sera donc possible d'obtenir des bandes interdites suivant une certaine polarisation mais pas suivant l'autre. On parlera alors de bandes interdites incomplètes. Il faut donc faire une résolution pour chaque polarisation de l'onde. De plus, la résolution doit se faire suivant les deux directions de propagation existantes. Heureusement, certaines symétries existent et permettent une résolution suivant des directions privilégiées en fonction du type de périodicité.

Deux types de mailles élémentaires sont utilisés en fonction du réseau considéré (figure 9). Elles se différencient par leur nombre de symétries qui est de 4 pour le réseau carré et de 6 pour le réseau hexagonal. Dans le cas d'une maille carrée, la zone irréductible de Brillouin peut se réduire à un triangle rectangle isocèle où les deux cotés égaux ont une longueur de $\frac{\pi}{a}$. Ce triangle est traditionnellement repéré par les lettres Γ , X et M . Dans le cas d'une maille hexagonale, la zone irréductible de Brillouin peut se réduire à un demi-triangle équilatéral désigné par les lettres Γ , K et M . Dans le cas 2D, on devrait donc résoudre l'équation maîtresse (1.39) pour chaque position à l'intérieur de la zone irréductible de Brillouin. Or, il se trouve que les cotés de cette zone correspondent à des extrema des fonctions $\omega_n(k)$ et donc, par continuité, on peut en déduire simplement l'intérieur.

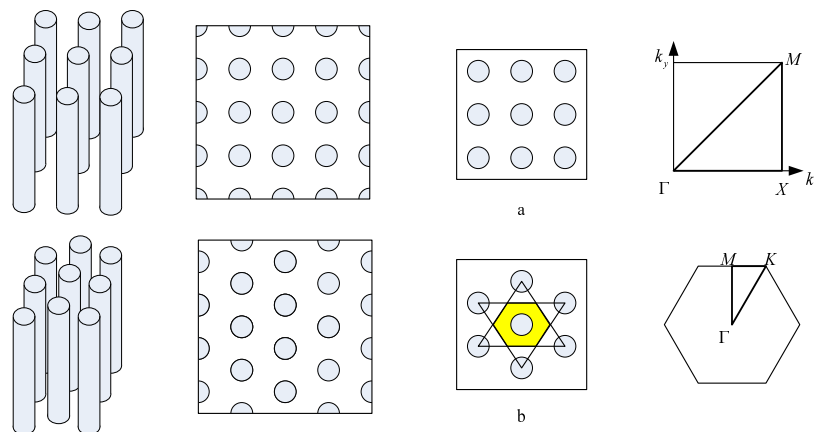


Figure 9 : différentes mailles élémentaires dans les cristaux photoniques à 2 dimensions et leur zone de Brillouin associée ; a : maille carrée et b : maille hexagonale.

La résolution de l'équation (1.39) se fait donc suivant ces directions privilégiées en mode TE et TM. On obtiendra alors des diagrammes de bande sur lesquels sont présents les propagations TE et TM et où le domaine d'étude est réduit aux trois directions indiquées par la zone irréductible de Brillouin.

Un exemple est donné à la figure 10. On peut observer sur le diagramme de gauche (figure 10) que la bande photonique est incomplète car elle n'existe que pour une polarisation TM ; au contraire le diagramme de droite montre une bande complète. Cette dernière est d'ailleurs difficile à obtenir avec des cristaux photoniques à deux dimensions. En effet, seul l'exemple présenté à la figure 10 avec des caractéristiques bien spécifiques permet l'obtention d'une bande complète.

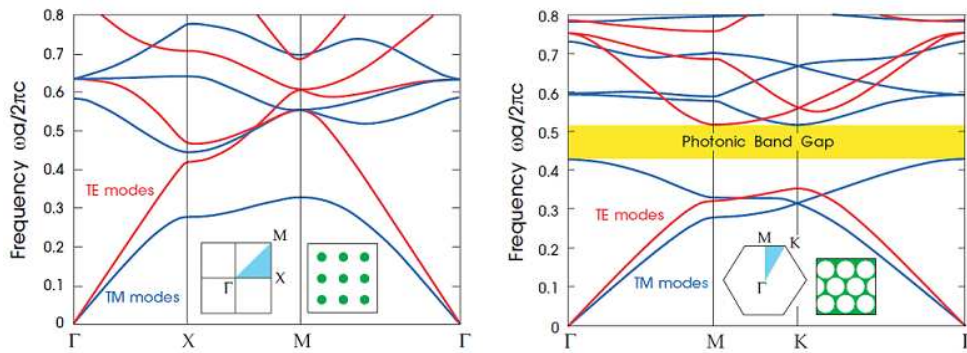


Figure 10 : Diagramme de bande de cristaux photonique 2D classique. A gauche un réseau carré de cylindres diélectriques formant une bande partielle en propagation TM et à droite un réseau hexagonal de trous dans un diélectrique formant une bande complète. (Tracés issus de [11]).

En réalité, une bande complète ne peut s'obtenir qu'en alliant les préférences des modes de propagation TE et TM. En effet, en polarisation TM, pour qu'une bande interdite existe, il faut être en présence d'une colonne de matière tandis qu'avec une polarisation TE, il faut être en présence d'un ruban. Ainsi, avec la configuration de droite (figure 10), on se retrouve bien en présence d'un « rond » de matière entre trois trous juxtaposés, et en présence d'un ruban de matière entre deux trous juxtaposés, pour aider à la formation d'une bande interdite en TM et TE respectivement.

v Conclusion

Cette partie nous a permis de faire des constats intéressants, d'établir des équations plus simples que si l'on utilisait directement du métal et surtout de visualiser le phénomène physique de création de bande interdite. En effet, que ce soit avec un métal ou un diélectrique, les bases théoriques sont les mêmes. Nous savons donc qu'il est inutile d'utiliser une structure à une dimension car la bande interdite n'est pas complète et dépendra de la polarisation et de l'incidence de l'onde. En revanche, concernant les agencements 2D, nous avons vu qu'il était possible à l'aide de structures particulières d'obtenir des bandes interdites quasi complètes. Nous allons donc nous intéresser tout particulièrement aux structures périodiques planaires à base de métal qui, elles, permettent d'atteindre les bandes de fréquences voulues. Ces structures portent d'ailleurs un nom spécifique : les surfaces sélectives en fréquence (SSF).

I.4.c Surface sélective en fréquence

i Introduction

Jusqu'ici, nous n'avons traité que les agencements de diélectriques bien adaptés aux fréquences optiques. Or, aux fréquences micro-ondes, les métaux sont plus adaptés car les structures formées peuvent être de taille inférieure à la longueur d'onde. Ils font donc l'objet de cette section.

L'étude des structures périodiques métalliques a commencé avec l'étude de grillages métalliques pouvant servir de réflecteur ou de polariseur dans les années 50. Ce n'est que dans les années 60 que sont apparues les surfaces périodiques métalliques ou surfaces sélectives en fréquence (SSF). Du fait de leur facilité de production, ces surfaces ont eu un fort succès dans les années 60, principalement pour des applications militaires. En effet, leur utilisation première était pour la réduction de la surface équivalente radar d'un objet. C'est ainsi que sont apparus les premiers radômes d'avion, permettant de laisser passer les ondes du radar embarqué, mais pas les autres, diminuant ainsi la SER aux autres fréquences que celle émise par le radar. On retrouve aujourd'hui les SSF dans beaucoup d'autres applications comme des antennes à fort gain ou reconfigurables [13][14], ou tout simplement, et comme nous les utiliserons dans ce mémoire, comme filtre dichroïque [15] (filtre spatial réjecteur de bande). Nous allons donc reprendre la théorie des cristaux photoniques afin de l'adapter aux SSF. Nous verrons, en donnant des exemples de motifs, que ces surfaces sont simples à fabriquer et qu'elles s'adaptent bien à notre application. Nous verrons aussi le comportement de ces SSF en présence d'un substrat.

ii Théorie générale basée sur celle des cristaux photoniques

Concernant le métal, les simplifications que nous avons faites sur les équations de Maxwell ne s'appliquent plus. Cependant, les matériaux considérés sont toujours isotropes et homogènes. De plus, l'utilisation de la loi locale de Ohm ($\vec{J} = \sigma \vec{E}$) et du principe de conservation de la charge électrique nous permettent de dire que la densité de charge, ρ , est nulle [16]. En effet, en réécrivant (1.38) avec ces nouvelles hypothèses on obtient :

$$\begin{cases} \vec{\nabla} \cdot \vec{H}(\vec{r}) = 0 & \vec{\nabla} \wedge \vec{E}(\vec{r}) - i\omega\mu_0 \vec{H}(\vec{r}) = \vec{0} \\ \vec{\nabla} \cdot (\epsilon_r \vec{E}(\vec{r})) = 0 & \vec{\nabla} \wedge \vec{H}(\vec{r}) + i\omega(\epsilon_0 \epsilon_r + i \frac{\sigma}{\omega}) \vec{E}(\vec{r}) = \vec{0} \end{cases} \quad (1.54)$$

En comparant (1.54) avec (1.38), on voit que la résolution peut se faire exactement de la même façon que pour les cristaux photoniques à condition que l'on définisse une nouvelle permittivité complexe $\hat{\epsilon}$:

$$\hat{\epsilon} = \epsilon_0 \epsilon_r - i \frac{\sigma}{\omega} \quad (1.55)$$

La partie imaginaire traduit les pertes que les ondes subissent lors de la traversée du matériau. Bien que les pertes dans un diélectrique soient faibles on peut utiliser cette même généralisation de ϵ . En effet, l'hypothèse faite pour les cristaux photoniques qu'aucun courant n'existe dans ces matériaux n'est pas totalement exacte car tout isolant à une très faible conductivité. Ces pertes sont généralement caractérisées par la tangente de perte :

$$\tan \delta_e = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \quad (1.56)$$

où ϵ'' et ϵ' sont respectivement les parties imaginaires et réelles de la permittivité. Le tableau 1 répertorie les valeurs de pertes et de permittivité de plusieurs diélectriques rencontrés dans ce travail.

Tableau 1 : Valeur de permittivité de matériaux évoqués dans ce mémoire. (Source : [17], [18], [19], [20])

Matériaux	permittivité relative	perte (tan delta)	Fréquence	Réf
FR4 (standard pour les cartes électroniques)	[4-5]	[0.025-0.1]	De 1Mhz à 10GHz	[18]
Papier (tout type)	[2-4]	[0.01-0.045]	A 900MHz	[19]
Contreplaqué ou panneau de particule	[1.7-3]	[0.04-0.125]	De 1 à 20GHz	[20-21]
Plâtre (BA13 standard)	[2.2-2.8]	[0-015-0.25]	De 2 à 60GHz	[20-21]
Béton (cellulaire)	[5.6-6]	[0.5-0.7]	De 1.7 à 6GHz	[20-21]
Linoleum	[3.04-3.08]	[6e-5-1.45e-3]	De 2 à 7GHz	[21]

Concernant les métaux, la conductivité est fonction de la fréquence. Plusieurs modèles existent pour décrire cette dépendance vis-à-vis de la fréquence (exemple du modèle de Drude). Néanmoins, dans notre cas, les variations sont suffisamment faibles pour être négligées étant donné la faible bande de fréquences que nous étudions. Ainsi, la permittivité complexe va pouvoir s'approximer par un imaginaire pur. On voit donc

encore apparaitre l'importance d'un matériau à forte conductivité, sans quoi cette approximation n'est plus valable.

Dans le même cas simpliste que pour l'élaboration de la relation de dispersion (1.46), on se retrouve ici avec la relation suivante :

$$k^2 = \frac{\omega^2 \hat{\epsilon}}{c^2 \epsilon_0} \Leftrightarrow k = \sqrt{\frac{\omega^2}{c^2} \epsilon_r + i\sigma\omega\mu_0}. \quad (1.57)$$

Etant donné les ordres de grandeurs mis en jeu, à savoir des fréquences proches du GHz et des conductivités avoisinant les 10^7 S/m :

$$k \approx \sqrt{i\sigma\omega\mu_0} = (1+i)\sqrt{\frac{\sigma\omega\mu_0}{2}} = \frac{(1+i)}{\delta}. \quad (1.58)$$

Au final, pour des SSF, les calculs et le fonctionnement seront les mêmes que pour les cristaux photoniques 2D mais il est nécessaire d'utiliser une permittivité et un nombre d'onde imaginaire. C'est d'ailleurs pour cette raison, qu'à part pour des structures très classiques, il est indispensable d'utiliser des outils de résolution numérique. L'apparition de structures multi-bandes n'a d'ailleurs pu se faire que récemment avec l'apparition d'outils de simulation suffisamment puissants. En effet, en prenant une cellule élémentaire des motifs et en utilisant le théorème de Floquet, déjà cité, associé à des moyens numériques puissants, on arrive à obtenir des courbes présentant l'atténuation en fonction de la fréquence, et ce, suivant différentes polarisations et incidences des OEM. De plus amples informations seront données dans le chapitre III réservé à la modélisation.

iii Motifs de filtrage

Pour une SSF, le motif métallique représente donc la caractéristique essentielle qui lui donne ses propriétés de filtrage. C'est donc d'une grande importance. Nous devons donc sélectionner le ou les motifs qui sont adaptés à notre application.

Selon Munk [21], les motifs peuvent être classés en différentes catégories en fonction de leur design (figure 11). Chacune des trois premières catégories aura des spécificités propres dans leur fonctionnement. Par exemple, les boucles présentent souvent un comportement bi-bande tandis que les motifs solides font de bons filtres passe-bas. D'ailleurs, grâce à l'utilisation de différents motifs, on peut obtenir des filtres

spatiaux de toutes sortes (figure 12). On peut aussi appliquer le principe de Babinet, consistant à inverser métal et isolant, afin de passer d'un coupe-bande à un stop-bande ou d'un passe-haut à un passe-bas ou inversement.

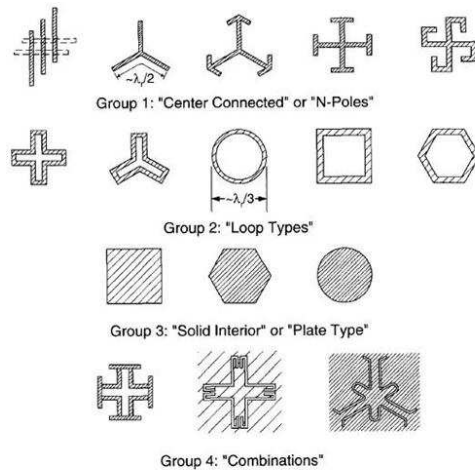


Figure 11 : Classification des motifs issue de [21].

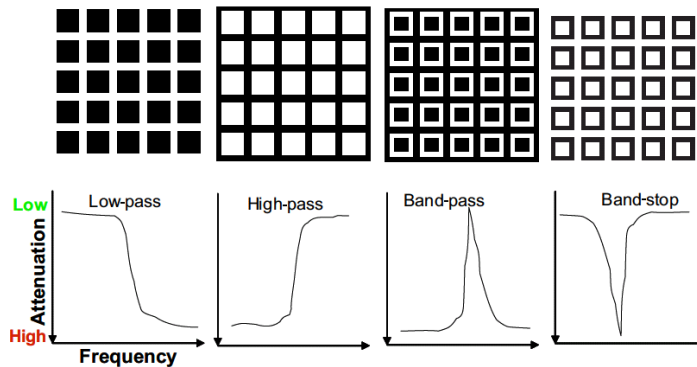


Figure 12 : Exemple de motifs simples permettant d'obtenir tous les types de filtres possibles.

On trouve depuis peu des motifs de filtrage multi-bandes [22] ce qui représente d'ailleurs encore aujourd'hui un enjeu important. Cependant, les SSF que l'on peut assimiler à des cristaux photoniques 2D présentent les mêmes inconvénients que ces derniers :

- sensibilité à la polarisation de l'onde ;
- sensibilité à l'angle d'incidence de l'onde.

Or, lorsqu'on travaille sur des structures multi-bandes, ces problèmes se retrouvent à chaque bande. Ainsi, l'obtention de motif de filtrage insensible à ces paramètres est une des fortes problématiques des SSF. Cependant, grâce à l'utilisation de motifs très spécifiques, on arrive à obtenir des designs quasiment insensibles aux

problématiques citées, mais cela pour une seule bande. Certains motifs [22] présentent cependant de bons, mais encore imparfaits, résultats pour une deuxième ou troisième bande. Les motifs les plus performants font d'ailleurs souvent l'objet de brevet ([23] ou [24] par exemple).

iv Effet du substrat

Un dernier point est à évoquer dans la présentation de cette technologie: le substrat. En effet, jusqu'ici les cristaux photoniques 2D que nous avons vus sont réalisés dans un bloc de diélectrique. Il est donc impossible de leur associer un substrat. Or, avec des motifs métalliques plans, c'est une obligation, pour des contraintes mécaniques évidentes, et il convient donc d'en visualiser les effets pour appréhender l'effet du papier.

En effet, l'ajout d'un substrat va avoir deux principales conséquences :

- la baisse de la fréquence de résonance de la SSF, que l'on peut relier à la partie réelle de la permittivité du substrat ;
- la diminution de l'atténuation provoquée par la SSF, que l'on peut relier à la partie imaginaire de la permittivité du substrat.

Concernant la fréquence de résonance, la figure 13 résume le comportement obtenu pour des substrats infinis. On voit sur cette figure qu'une SSF sans substrat, dont la fréquence rejetée est f_0 , voit sa fréquence de résonance divisée par $\sqrt{\epsilon_r}$ lorsqu'elle est placée entre deux diélectriques identiques infinis de permittivité ϵ_r . Lorsqu'un diélectrique infini n'est présent que d'un seul coté de la SSF, f_0 est divisé par $\sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}}$.

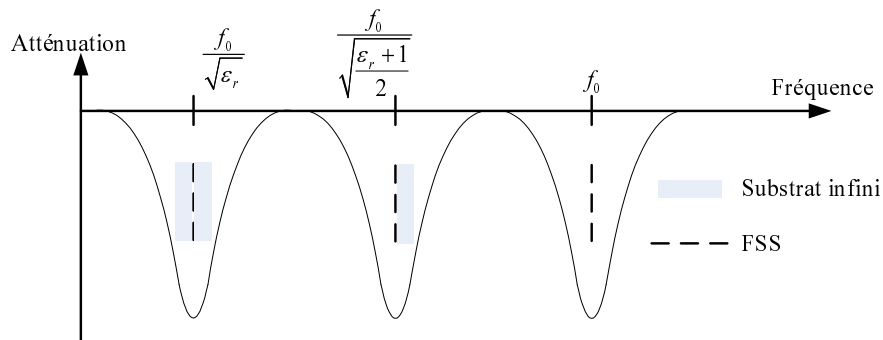


Figure 13 : Modification de la fréquence de résonance d'une SSF lorsqu'elle est plongée entièrement dans un substrat infini ou posée sur un substrat infini.

Or, dans la réalité, le substrat n'est jamais infini mais grâce à la référence [21], nous pouvons affirmer que même pour des épaisseurs allant jusqu'à $\lambda/20$ (1.67cm à 900MHz), les valeurs demeurent proches de celles données dans ce schéma.

Enfin, concernant les pertes dans les substrats, elles provoquent une diminution de l'atténuation provoquée par la SSF comme nous le verrons dans le chapitre III.

v Conclusion

Nous avons défini mathématiquement la différence entre les cristaux photoniques standards et les surfaces sélectives en fréquence, qui ne sont ni plus ni moins que des cristaux photoniques métalliques 2D. Nous avons vu que ces SSF paraissent particulièrement bien adaptées à notre problématique. Ainsi, il suffirait de créer des motifs métalliques sur notre papier pour arriver à filtrer des fréquences spécifiques. Les dimensions de ces motifs sont d'ailleurs de quelques millimètres ce qui est bien adapté aux possibilités de fabrication actuelles. En revanche, l'importance du motif est cruciale et nous avons donné l'exemple de plusieurs motifs simples classés par type. Nous avons pu voir que l'utilisation de papier à la place d'un substrat plus traditionnel ne devrait poser aucuns soucis car les caractéristiques électromagnétiques des papiers sont du même ordre de grandeur que celles des substrats classiques. Seules les épaisseurs changent, passant en dessous de la limite de $\lambda/20$ pour le papier, ce qui nous obligera à prendre en compte les substrats sur lesquels sera posé le papier (cf section VI.4.a). Enfin, nous avons aussi vu que seuls des moyens numériques seraient capables de calculer l'efficacité de ces SSF.

I.5 Conclusion et choix d'une technologie

Ce chapitre a permis de faire un état de l'art de certaines technologies qui permettraient de modifier le comportement des OEM et d'en comprendre les mécanismes. De cette façon, nous sommes maintenant en mesure de choisir une de ces technologies afin de conférer au papier des propriétés de barrière aux ondes électromagnétiques.

Cependant, comme présenté lors de l'introduction, seuls certains appareils ou technologies de communication sans fil posent aujourd'hui problème étant donné leur prolifération. Il en découle que seules certaines bandes de fréquences sont concernées

par l'utilisation d'un papier filtrant les ondes. Par ailleurs, les contraintes de sécurité obligent parfois à maintenir l'existence d'un lien radio (donc basse fréquence), d'où l'exclusion de solutions comme les cages de Faraday censées filtrées toutes les ondes.

L'utilisation de feuille de papier comme substrat nous limite beaucoup dans la technologie utilisable. En effet, les écrans de Salisbury ainsi que les matériaux absorbants ont besoin d'un certain degré de liberté sur l'épaisseur du substrat, que nous n'avons pas dans notre cas si on se limite stricto sensu au papier « standard ».

La technologie à adopter est donc toute trouvée : les surfaces sélectives en fréquence.

Le but va donc être de créer sur un papier des motifs conducteurs afin d'obtenir un comportement de filtre dichroïque. Pour réaliser cela, les technologies d'impressions d'encres conductrices paraissent bien adaptées. Cependant, ces impressions se font traditionnellement sur des supports avec un bien meilleur état de surface que le papier (PVC, verre, etc.). Il convient donc d'étudier le potentiel d'impression de ces encres sur du papier et de bien connaître les technologies d'impression qui permettent de les utiliser.

II Etat de l'art de l'électronique imprimée et choix d'une technologie d'impression

II.1 Introduction

Comme nous l'avons vu précédemment, la technologie retenue est basée sur la création, sur du papier, de motifs conducteurs. Pour y arriver de nombreuses technologies existent. Les technologies de dépôt métallique sont les plus connues et certainement les plus performantes. Des attaques, chimiques ou mécaniques, sont réalisées sur des substrats pré-enduits de cuivre. Ces technologies ont grandement évolué pour tendre aujourd'hui vers la réalisation de structures de taille nanométrique. Malgré leur évolution, elles demeurent des technologies soustractives (enlèvement de matière) et quasi-impossible à mettre en place avec un substrat papier. Au contraire, les technologies d'impressions, même si elles représentent aujourd'hui des investissements très importants pour leur développement, apparaissent comme l'avenir d'une partie de l'électronique [25]. Cependant il est fort probable que les performances obtenues soient limitées et ne puissent jamais atteindre celles de l'électronique sur silicium. En revanche, elles font déjà grandement diminuer les coûts de fabrication et permettent l'apparition de nouveaux objets pour notre quotidien [25].

Nous allons donc voir dans cette partie un peu plus en détail ce qu'est l'électronique imprimée et à quoi elle peut servir. Nous verrons qu'il faut faire la distinction entre électronique passive et électronique active et insisterons un peu plus sur la partie passive dans laquelle on peut inclure le métapapier.

Nous verrons ensuite rapidement quels sont les substrats généralement utilisés pour l'électronique imprimée. Nous verrons d'ailleurs pourquoi le papier n'en fait que très rarement partie avant de donner plus de détails sur ce substrat que nous avons choisi.

Nous décrirons ensuite les technologies d'impression que l'on peut utiliser pour l'électronique imprimée. Pour cela, après un rapide historique de chacune, nous expliquerons son fonctionnement avant d'en donner les principaux avantages et inconvénients. A l'aide d'un résumé de leurs caractéristiques respectives nous

présenterons ensuite le choix fait d'une technologie à utiliser vis-à-vis des critères que le développement de notre application nous impose.

Nous concluons enfin cette partie en donnant quelques perspectives sur l'utilisation possible d'autres technologies pour répondre à des besoins précis issus de notre application.

II.2 Electronique imprimée

II.2.a Introduction

L'électronique imprimée est une industrie promise à un brillant avenir selon certains [25]. En effet, elle est un nouveau marché non concurrent des technologies silicium estimé à 300 milliards de dollars en 2025, soit le double du marché silicium actuel. De ce fait, l'OEA (Organic Electronic Association) a établi une route à suivre dans les années à venir pour les technologies issues de cette industrie. La figure 14 en est la représentation. Elle permet de comprendre un peu mieux ce qu'est exactement l'électronique imprimée. L'idée de base est l'intégration dans des objets du quotidien de fonctionnalités interactives ou intelligentes reposant sur l'électronique. On voit par exemple figure 14 des tags RFID que l'on peut mettre en place sur le carton d'emballages alimentaires, des cellules solaires sur le tissu de vêtements, etc. Malgré cette feuille de route, deux technologies différentes cohabitent. La première, dite active, permet d'apporter les fonctionnalités les plus complexes en imprimant des transistors [26]: l'affichage [27], la mémoire [28], le calcul [29], etc. L'autre, dite passive, permet de véhiculer l'ensemble des informations entre les différents composants et de réaliser les fonctions les plus simples : antennes [30], filtres [31], etc. Il s'agit dans les deux cas d'utiliser des composants particuliers mis en solution pour former une encre. Il peut s'agir de semi-conducteurs organiques ou inorganiques, de conducteurs métalliques, de nanoparticules ou de nanotubes. L'encre est ensuite imprimée sur différents supports à l'aide de diverses technologies d'impression. Dans le cas présent, le métapapier est apparenté à du filtrage et ne nécessite donc que l'utilisation d'une technologie passive.



Figure 14 : Route à suivre définie par l'OE-A pour l'électronique organique et les applications issues de l'électronique imprimée (photos : Konarka, Sony, [32], Avaana, OE-A, [33], Powerpaper, OE-A, Andrew Schneider's solar bikini).

II.2.b Electronique imprimée active

Pour ne dire que quelques mots sur l'électronique active, elle utilise des matériaux qui s'apparentent, dans l'électronique classique, aux semi-conducteurs. C'est ce qu'on appelle des polymères conducteurs comme le poly acétylène ou d'autres [34]. Derrière ce nom se cache la composition. En effet, un polymère est un enchainement

d'un grand nombre de motifs monomères identiques ou différents. L'ADN est, par exemple, un des très nombreux polymères naturels qui nous entourent. Or, depuis le 20^{ème} siècle, l'homme a appris à travailler ces polymères pour les inclure dans beaucoup d'objets du quotidien (plastiques ou non). Mais ce n'est qu'en 1977 que deux équipes de chercheurs [35] ont réussi à fabriquer un polymère conducteur. Pour cela, elle fut récompensée en 2000 par le prix Nobel de chimie. Nous ne rentrerons pas ici dans les détails de ces matériaux mais il faut tout de même préciser que les transistors dits organiques (à base de polymères conducteurs) ne pourront jamais concurrencer le silicium dopé en termes de performances [36][37]. En effet, ceci est dû au mécanisme de conduction qui diffère entre ces deux types de matériaux [38]. Malgré cela, le développement de ces matériaux est en plein essor car leur production et leur mise en application est potentiellement plus bas-coût que celles sur silicium. Ces technologies répondent donc parfaitement à certains besoins, comme ceux de la RFID [39][40][41], des cellules photovoltaïques [42][43] ou d'autres applications ne nécessitant pas de performances élevées [44]. Certains de ces matériaux organiques font l'objet de beaucoup de recherches, comme les nanotubes de carbone. En effet, on pense qu'ils pourraient atteindre des performances supérieures à celles des matériaux standards tant métalliques que semi-conducteurs [45]. Ces possibilités sont cependant aujourd'hui limitées par des moyens de production et de mise en application encore immatures.

II.2.c Electronique imprimée passive

Concernant les technologies passives qui nous concernent plus directement, il s'agit d'impression d'encre à base de particules métalliques. L'ensemble des références déjà citées ([26]-[31], [39]-[44].) dans cette partie les utilise ne serait-ce que pour les interconnexions ou les contacts électriques. Nous allons donc nous contenter ici d'en expliquer l'historique et le fonctionnement.

C'est à partir de la fin des années 70 que Buffat & al [46] établit que la taille des particules métalliques influe sur leur température de fusion. Il ne faudra pas longtemps ensuite pour commencer à voir apparaître les premiers travaux de recherche sur des encres conductrices à proprement parler [47]. L'idée était d'utiliser des particules métalliques de très petites tailles, mélangées dans des encres, afin de les imprimer à l'aide de machines d'impression standards sur différents supports. Un recuit permet

ensuite de faire s'agglomérer les particules pour former un film continu conducteur. La technologie évoluant, on trouve aujourd'hui des encres à particules métalliques de taille nanométrique (10 à 60nm environ), constituées d'argent à des prix avoisinant le k€/kg.

La composition de l'encre est très importante et il est très difficile de trouver le bon équilibre entre les trois composants de l'encre à savoir le liant, le véhicule et les additifs. Le premier sert à assurer la cohésion de l'encre et à contrôler sa viscosité. C'est ce paramètre qui détermine par quel procédé d'impression l'encre peut être déposée. Le deuxième composant, aussi appelé solvant, sert à transporter l'encre en la maintenant en phase liquide et va jouer un rôle prépondérant lors du séchage. Dans le cas d'encre conductrice, il permet aussi de prévenir l'oxydation des particules. Le troisième composant donne ses propriétés à l'encre comme par exemple des particules métalliques pour la rendre conductrice. La formulation typique d'une encre conductrice est donnée dans le tableau 2.

Tableau 2 : Formulation typique d'une encre conductrice.

	Masse (%)	Volume (%)
Additif	63	20
Liant	16	8
Véhicule	21	72

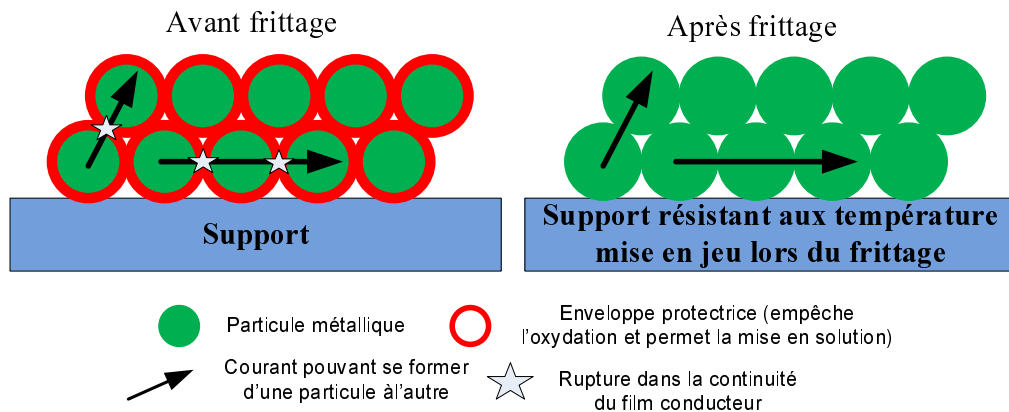


Figure 15 : Représentation d'une encre à particules métalliques avant et après frittage.

Les particules d'argent sont obtenues en partant soit d'une masse d'argent pur, soit de précurseurs moléculaires réagissant avec l'additif pour former des particules conductrices. Le recuit fait évaporer le solvant permettant aux particules d'argent de s'agglomérer entre elles, autorisant ainsi la conduction. La figure 15 à gauche montre l'agencement des particules entourées de sa couche protectrice de solvant. On conçoit aisément qu'aucune conduction électrique ne peut avoir lieu en raison de la forte

résistivité du solvant entourant chaque particule d'argent. En revanche, à droite, on voit qu'une fois le recuit effectué le solvant n'est plus présent, une conduction électrique peut alors s'établir.

Ce recuit, traditionnellement effectué aux alentours des 300°C, est d'ailleurs un des principaux freins techniques et économiques à l'utilisation de ces encres. La figure 16 montre une famille de courbes qui illustre le comportement de la résistivité de l'encre en fonction du temps de séchage. On voit que plus le temps de séchage augmente, plus la résistivité diminue. Un palier est finalement atteint au bout d'un certain temps. La valeur et le temps mis à atteindre ce palier sont fonction de la température de recuit. En effet, on voit grâce aux différentes courbes que, plus la température augmente, la courbe rouge correspondant à la température la plus haute, et plus le temps mis à atteindre le palier est court et plus la valeur de résistivité correspondant à ce palier est faible. On comprend donc que dans le cas où le recuit est effectué à faible température, voire pas du tout, les performances de l'encre une fois déposée et séchée risquent d'être faibles.

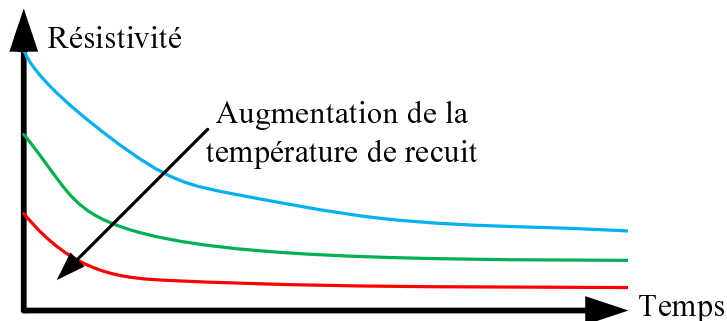


Figure 16 : Evolution de la résistivité en fonction du temps et de la température de recuit traditionnellement constatée pour les encres à base de particules métalliques.

Aujourd'hui, de nombreux travaux sont entrepris pour abaisser cette température jusqu'à 100 ou 150°C soit en diminuant la taille des particules [48], soit en modifiant le solvant [49]. On arrive ainsi à trouver des encres qui ne nécessitent plus du tout de recuit mais seulement un simple séchage. Cependant, malgré ces améliorations, le comportement demeure toujours le même. Heureusement les améliorations successives de ces encres font en sorte de faire évoluer les courbes caractéristiques petit à petit de la courbe bleue vers la courbe rouge tout en abaissant la température et le temps de recuit. Certains travaux permettent même de faire des recuits très rapides à l'aide de laser [50] et certains appareils sont commercialisés [51]. Une autre piste qui est étudiée est celle

de remplacer l'argent par du cuivre [52], métal beaucoup moins cher (rapport d'environ 100 sur le prix au kg en 2011), mais, beaucoup plus complexe à mettre en solution. En effet le cuivre a tendance à réagir avec beaucoup d'autre matériau pour se transformer en oxyde, ce qui complique grandement la formulation de l'encre. Néanmoins, certaines encres commerciales à base de particules de cuivre commencent à voir le jour. Malheureusement seul leur prix est intéressant car, bien qu'elles présentent une conductivité équivalente à celle de l'encre à base d'argent, leur durée de vie une fois déposée est souvent très inférieure (quelques semaines pour les encres à base de cuivre contre quelques années pour celles à base d'argent).

II.2.d Conclusion

Nous avons précisé que la raison d'être de l'électronique imprimée est l'intégration dans des objets du quotidien de fonctionnalités interactives ou intelligentes reposant sur l'électronique. Pour cela, il faut absolument que les coûts de production soient extrêmement bas et donc que les volumes de production soient importants. Il faut aussi que la technologie puisse être déposée sur des substrats souples pour s'adapter au grand nombre d'objets de notre quotidien. L'impression, en plus d'utiliser des encres depuis de très nombreuses années, est particulièrement adaptée à ces contraintes. Nous allons donc décrire ces technologies et faire le choix de celle qui est la plus adaptée à nos besoins à l'heure actuelle.

II.3 Description des technologies d'impression

II.3.a Introduction

Les technologies d'impression sont de plus en plus nombreuses. Nous n'aborderons d'ailleurs que les technologies suivantes : sérigraphie, offset, jet d'encre, flexographie et héliographie car ces technologies sont toutes bien maîtrisées par les industriels du monde de l'impression et ne nécessitent « qu'une » adaptation au monde de l'électronique imprimée. Elles permettent toutes aussi l'industrialisation nécessaire à la réalisation de notre projet.

Il est utopique de vouloir présenter leurs performances actuelles dans le cadre de l'électronique imprimée. En effet, il est difficile d'obtenir et/ou de donner des

informations précises sur les performances de chaque technologie avec les encres conductrices pour plusieurs raisons. Elles dépendent fortement du type d'encre utilisée, de l'application visée, de la surface mise en jeu lors de l'impression, etc. Une difficulté majeure vient également du fait qu'elles sont en réelle évolution et les performances de 2009 sont apparues totalement obsolètes à l'été 2010. De plus, les performances obtenues sont souvent gardées secrètes par les industriels les développant. Néanmoins, il apparaît que les performances générales de l'utilisation de chaque technologie pour l'électronique imprimée tendent vers les performances obtenues lors d'une utilisation standard de cette technologie. De plus, ces technologies ont des qualités et des défauts qui sont les mêmes en utilisation « normale » ou avec des encres conductrices. Ainsi, pour chaque technique, nous présentons un rapide historique avant d'aborder leur fonctionnement. Nous décrirons ensuite leurs principaux défauts et qualités puis, donnons au final quelques exemples notoires de réalisations faites avec chaque technologie pour l'électronique imprimée.

Concernant les autres technologies d'impression non mentionnées dans ce document le lecteur pourra trouver dans la littérature des documents complets décrivant l'ensemble de ces procédés et leurs principaux atouts pour le prototypage [53] ou pour des applications particulières [42]. Il s'agit en effet de technologies inadaptées à une industrialisation à bas coût nécessaire au présent projet, puisqu'elles ne sont pas compatibles avec la production en rouleau. Il s'agit par exemple de technologies à base d'ablation laser,

II.3.b Jet d'encre

i Historique

C'est sans aucun doute, à l'heure actuelle, la technologie la plus connue. Elle a permis en effet de démocratiser les systèmes d'impression de part son utilisation avec les ordinateurs. En effet, elle ne nécessite pas de fabriquer des plaques d'impressions et peut produire un design différent à chaque instant (d'où sa classification dans les technologies d'impression numériques). Cette technologie est basée sur un principe scientifique découvert en 1878 par Lord Rayleigh. Il a pu montrer qu'en appliquant une onde de pression à un jet de liquide, il pouvait se séparer en gouttes uniformes. Ce n'est

pourtant que dans les années 1960 que l'idée d'utiliser ce principe dans une machine d'impression émergea. On fabriqua alors un réservoir d'encre dans lequel on pouvait appliquer une pression juste devant une ouverture (ce réservoir portera le nom de buse d'impression). En fonction de cette pression, des dimensions de l'ouverture et des propriétés de l'encre, des gouttes de différentes tailles se forment. Cette technique émet donc des gouttes en continu et une seconde partie du procédé consistait à dévier les gouttes non désirées. Pour pallier aux problèmes de cette technique, une technologie de gouttes à la demande est apparue en 1977. C'est cette deuxième technique qui est utilisée en électronique imprimée.

ii Description du procédé à la demande

La technologie à la demande plus connue sous son nom anglais, *Drop On Demand* (DOD), est basée sur le même principe physique que la méthode continue. Cependant, comme son nom l'indique, l'éjection se fait cette fois-ci uniquement à la demande. Elle permet de se passer des dispositifs complexes de charge et de déflexion obligatoire avec la première méthode. Ces dispositifs doivent cependant être remplacés par un moyen permettant de créer une onde de pression, à la demande, directement dans la buse. La plus utilisée aujourd'hui est la technologie piézoélectrique. L'onde de pression est créée par l'application sur une membrane piézoélectrique d'un champ électrique qui va compresser le réservoir d'encre et ainsi faire éjecter une goutte (figure 17).

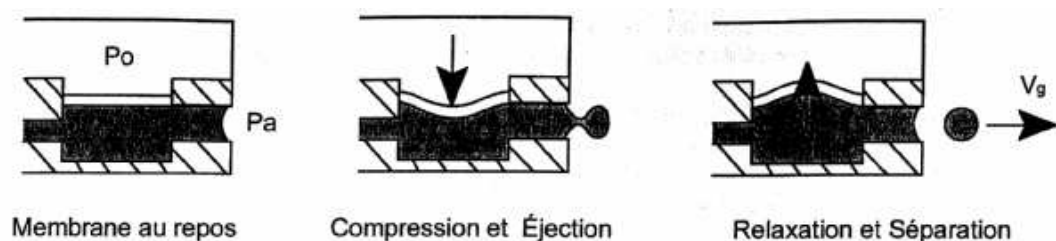


Figure 17 : Cycle de formation d'une goutte avec un actuateur piézoélectrique [54].

D'autres types d'actuateurs ont ensuite vu le jour et sont utilisés aujourd'hui (voir figure 18). Chacun ayant certaines applications pour lesquelles ils se montrent particulièrement efficaces. On distingue en vert figure 18 les deux principales technologies utilisées pour l'électronique imprimée : la buse piézoélectrique et la technologie d'*Aerosol Jet*.

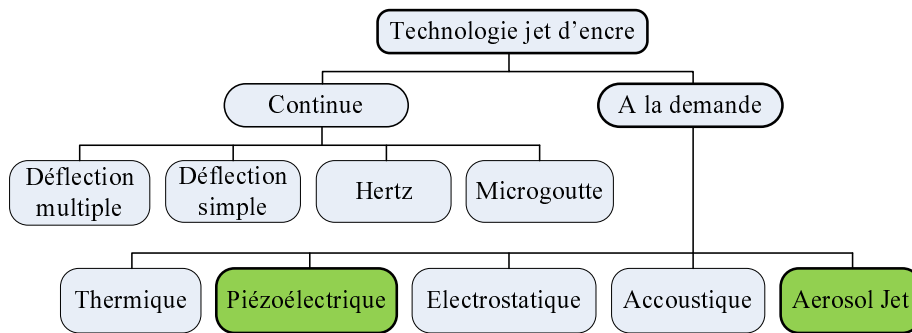


Figure 18 : Principales technologies jet d'encre (en vert celles primées pour l'électronique imprimée).

La seconde a d'ailleurs été spécifiquement développée pour les applications d'électronique imprimées [55]. Cette fois-ci, ce ne sont plus des gouttes qui sont émises à la demande mais un jet sous forme gazeux contenant les particules conductrices. Malheureusement, le gain en résolution qui en résulte permettant d'atteindre les 5 à 10 μ m de résolution, se fait au détriment de la vitesse d'impression.

iii Avantages et inconvénients

Aujourd'hui, ces technologies (DOD piézoélectrique principalement) se développent énormément grâce à leurs nombreux avantages :

- possibilité d'impressions personnalisées à chaque tirage ;
- possibilité d'impressions sur tout support même avec des reliefs et sur de très grandes laizes ;
- très grande finesse de l'impression (10 μ m environ) ;
- très peu polluant.

En revanche, comparé à des procédés plus anciens, elles comportent aussi quelques défauts :

- faible vitesse d'impression bien qu'en net progrès (jusqu'à 150m/min pour certaines machines spécialisées) ;
- bouchage des buses d'impressions qui entraînent une maintenance lourde et qui tend à diminuer la durée de vie des machines ;
- grande qualité de support nécessaire (rugosité, absorption) ;
- faible quantité d'encre déposée (1 à 2 μ m) et difficulté à sur-imprimer une deuxième couche.

iv Conclusion sur son utilisation

Concernant les applications d'électronique imprimée, les travaux se basant sur cette technologie d'impression sont très nombreux. Qu'ils aient pour but la réalisation d'antenne [56], de filtre [31], de tag RFID [57], de micro-capteur [58], d'OLED [59], de transistor [60] ou de cellule photovoltaïque [61], tous les travaux actuels ont un point commun qui fait que la technologie jet d'encre leur est particulièrement adaptée : ce ne sont que des prototypes. En effet, même si l'utilisation de prototype en électronique est une obligation et fait donc du jet d'encre un procédé intéressant, on ne peut se limiter à cela. Or, développer des connaissances sur une technologie d'impression est un travail suffisamment important que devoir le refaire au moment de l'industrialisation est prohibitif.

En revanche, lorsqu'il s'agit de passer à l'industrialisation, l'utilisation d'autres procédés d'impression permet de gagner en productivité et ainsi, de diminuer les coûts de fabrication. Il va donc de soi que même si ce procédé est très utile et est souvent à privilégier pour le prototypage, il est trop coûteux pour des grandes séries de part sa faible productivité. De plus, l'épaisseur d'encre déposée est assez faible, et le papier n'est pas considéré en électronique imprimée comme un support de bonne qualité en termes de rugosité notamment. Nous préférons donc écarter cette technologie.

II.3.c Sérigraphie

i Historique

Ce procédé est sans doute le plus ancien car les dessins des grottes préhistoriques peuvent être considérés comme ayant été fabriqués avec cette technologie. Historiquement, elle a été bien utilisée et améliorée par les Japonais qui, lors de la forte immigration aux Etats-Unis au début du 19^{ème} siècle, ont fait connaître cette technologie à l'occident. C'est en 1907 qu'un premier brevet de Samuel Simons apparaît. La technique est ensuite rapidement améliorée pour obtenir des systèmes se basant sur le même principe que ceux actuels.

ii Description du procédé

La figure 19 illustre le procédé. Il s'agit donc de placer un négatif sur un écran, généralement en soie, constitué de maille. Pour les hommes préhistoriques, la main faisait office d'écran et de négatif. On vient ensuite, après avoir déposé une substance colorée (poudre ou encre), passer une racle sur l'écran afin de faire pénétrer l'encre à travers les mailles pour former l'image sur le support. Il suffit ensuite de faire plusieurs passages avec un écran différent et une substance de couleur différente afin d'ajouter de la couleur aux endroits désirés. Aujourd'hui, industrialisation oblige, de nombreuses améliorations ont été apportées à ce dispositif. Que ce soit le repérage de l'impression, réalisé automatiquement, l'obturation des pores de l'écran réalisée par insolation de résine, l'utilisation de couleurs imprimées les unes à la suite des autres, ou le raclage, réalisé par une machine contrôlant la pression appliquée, l'ensemble des points clés de cette technologie est contrôlable par une machine.

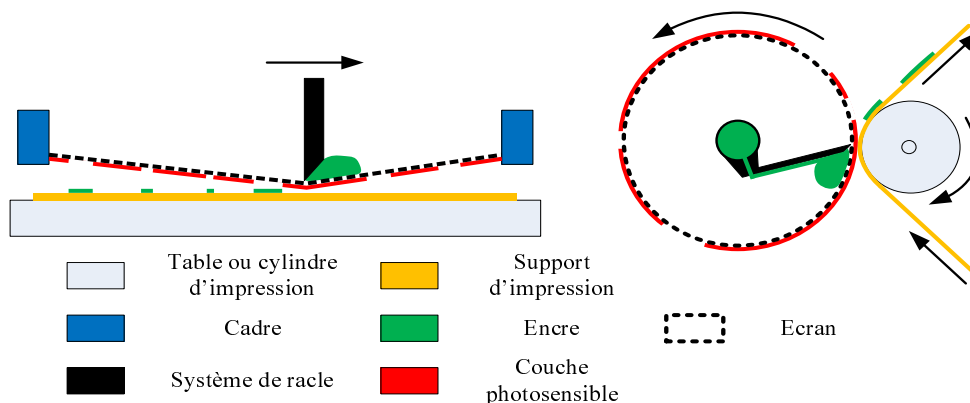


Figure 19 : Représentation classique de sérigraphie à plat (à gauche) et rotative (à droite).

iii Avantages et inconvénients

Bien qu'elle soit, petit à petit, remplacée par des technologies numériques comme le jet d'encre elle présente encore quelques qualités :

- possibilité d'imprimer sur tous les supports quelle que soit leur taille ;
- possibilité d'imprimer une grande épaisseur d'encre ;
- simplicité de mise en place pour le prototypage.

Elle présente cependant de nombreux inconvénients :

- sa vitesse d'impression limitée, que ce soit à plat (<800 feuilles/h) ou avec des machines rotatives (<2000 feuilles/h) ;
- son impossibilité à imprimer des détails trop fins (limités à 100µm environ) ;
- son manque de précision dans le repérage de l'impression lorsque plusieurs couleurs sont nécessaires.

iv Conclusion sur son utilisation

En raison de ses avantages, elle reste grandement utilisée dans la signalétique routière ou les affiches publicitaires, pour lesquelles les rendus graphiques des couleurs et leur tenue dans le temps sont plus importantes que la qualité d'impression. De la même manière, c'est la technologie préférée des artistes graphiques et elle est encore beaucoup utilisée dans l'industrie du textile.

Dans le cas de l'électronique imprimée, sa capacité à imprimer une grande quantité d'encre, et ce avec un procédé facile à utiliser, en fait un bon candidat pour l'impression électronique sur tissu [62] ou le prototypage [63]. Cependant dans le cas de son utilisation pour produire du métapapier, du point de vue de l'industrialisation, ce procédé ne possède pas une cadence de production suffisante ni une résolution suffisamment fine. C'est d'ailleurs la raison principale qui fera que nous rejeterons cette technologie dans le choix que nous ferons en II.4.

II.3.d Offset

i Historique et description du procédé

Pour parler de cette technologie d'impression il convient de parler de quelques uns de ces ancêtres : la lithographie et la chromolithographie. Ces procédés sont, depuis Gutenberg, une première étape de l'évolution vers des technologies « modernes ». La lithographie fut inventée en 1796 par Aloys Senefelder et arriva en France en 1802. Elle fut de plus en plus appréciée par les artistes et fut démocratisée grâce à l'invention de la chromolithographie dès 1837 qui permit d'imprimer des couleurs (bleu, jaune, rouge). L'arrivée des affiches publicitaires, des images éducatives ou récréatives, associées aux capacités de production de ces presses lithographiques ou chromolithographiques font proliférer ces clichés aussi appelés chromos.

Cette technologie repose sur le principe physique de tension interfaciale [64], en l'occurrence sur la répulsion mutuelle entre un corps gras et l'eau. A l'origine, profitant de cette propriété, on dessinait avec un crayon gras sur une pierre calcaire plate que l'on humidifiait ensuite (le calcaire étant poreux retenait l'eau). On venait ensuite appliquer de l'encre sur la pierre, à l'aide d'un rouleau, qui ne se déposait que sur le tracé fait. En effet, l'encre étant grasse, elle ne peut se déposer que sur le dessin fait au crayon gras et est repoussée par les surfaces mouillées. On venait ensuite presser sur une feuille la pierre encrée pour transférer l'encre.

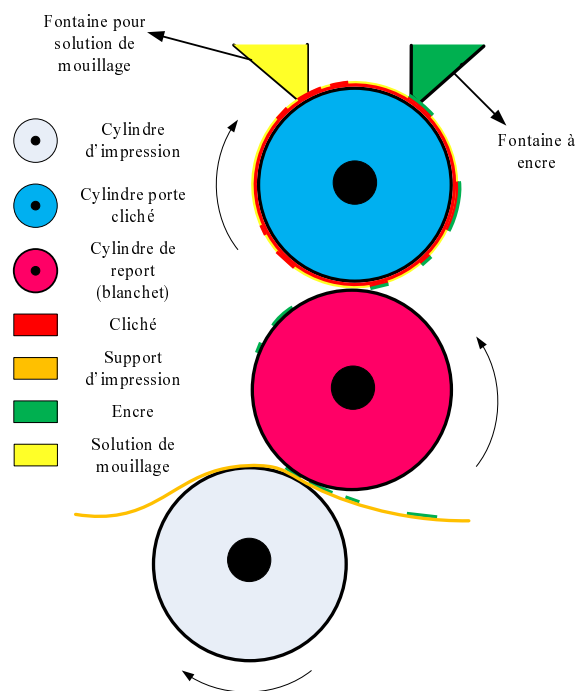


Figure 20 : Schéma d'impression offset conventionnelle.

Il faudra attendre 1870 pour que se répandent des machines à cylindre semi-automatique (qui remplace la presse) qui vont grandement augmenter la productivité de ces machines. Petit à petit, avec l'amélioration de la technologie, l'offset à proprement parler va naître en 1903 grâce à l'imprimeur américain Ira Washington Rubel. La première qualité du système offset est d'utiliser un blanchet (cylindre de caoutchouc) qui va permettre de faire un report intermédiaire entre le système d'encrage/mouillage et le papier comme le montre la figure 20. Cela permettra d'améliorer grandement la durée de vie de ces machines. En effet le blanchet va permettre d'absorber les chocs, les particules étrangères ou les inégalités d'épaisseurs de papier. On fabrique donc des plaques ou clichés du motif à imprimer et on les implante sur le cylindre porte-cliché

qui va recueillir l'eau ou toute autre solution de mouillage en premier, puis l'encre, qui va ensuite être transmise sur le blanchet. Ce dernier va alors transférer l'encre sur le support d'impression. Voilà pourquoi on parle aussi de technologie à double report. Le schéma de principe de l'ensemble du procédé est donné figure 20.

ii Avantages et inconvénients

Aujourd'hui l'offset est la plus utilisée des techniques grâce à ses nombreux avantages :

- possibilité d'imprimer sur de nombreux supports (papier, carton, métal, etc.) ;
- qualité d'impression bonne pour un coût assez faible (50 μ m de résolution environ) ;
- rentabilité pour des tirages allant jusqu'à des centaines de milliers d'exemplaires (très utilisé pour toute la presse et les emballages).

En revanche elle possède certains inconvénients :

- démarrage d'une impression long et gaspillant de la matière (encre et papier) d'où, en partie, une faible rentabilité sur de petites séries (<1000 exemplaires) ;
- épaisseur d'encre imprimable faible (limitée à 2-3 μ m) par passage ;
- usure des plaques de report qui peut dégrader l'impression.

iii Conclusion sur son utilisation

Dans le cas présent, pour imprimer le métapapier cette technologie semble difficile à exploiter. En effet, peu de travaux ont vu le jour avec ce type de procédé car il est coûteux pour les petites séries et le prototypage et ce, même pour des machines feuille à feuille à un seul groupe. De plus, les encres pour l'offset présentent des propriétés rhéologiques qui n'avantagent pas la conductivité ni leur fabrication et elles sont difficiles à se procurer. Certains travaux ont cependant montré que cette technologie peut être utilisée pour la réalisation d'interconnexions et de composants passifs sur papier [65][66] ou même de cellules photovoltaïques sur des supports plastiques [67]. Sans autres comparaisons (réalisée en II.4) il est impossible à ce stade de se prononcer sur un éventuel choix de cette technologie.

II.3.e Fléxographie

i Historique

Cette technologie est aujourd'hui une concurrente directe de l'offset. En effet, même si elle n'est pas autant utilisée, elle est en passe de l'être. Sa création remonte d'ailleurs à la même époque que l'offset mais provient d'une technologie différente de la lithographie : la typographie. Il s'agissait à l'époque de mettre en place des caractères, fondus dans une masse de plomb, puis de les presser contre une feuille après les avoir enduits d'encre. Ce n'est pourtant qu'en 1890 qu'on verra apparaître la première presse « industrielle » permettant un encrage et une presse automatique. Les encres utilisées étaient à base d'eau et furent inventées par Bibby, Baron and Sons. Cette encre avait tendance à salir l'impression. Ceci explique pourquoi les clichés imprimés par cette presse furent rebaptisés les folies de Bibby.

Ce n'est qu'au début du 20^{ème} siècle que l'utilisation d'encre à base d'aniline, accompagnée de rouleau de pression à base de caoutchouc permettra de résoudre ce problème et de démocratiser les produits imprimés par cette technologie. A cette époque, le procédé est d'ailleurs appelé *impression aniline*. Sa capacité à imprimer sur des surfaces irrégulières (comme le carton) en fait un des leaders dans l'impression d'emballage alimentaire aux Etats-Unis. L'aniline est déclarée substance toxique dans les années 1940 et des encres de substitution sont trouvées à base d'eau ou de solvants. Etant donné le caractère péjoratif de l'aniline, un groupement d'imprimeurs décide de rebaptiser cette technologie d'impression *flexographie* en 1952. Le procédé va ensuite bénéficier des avancés technologiques lui permettant d'imprimer sur beaucoup de substrats différents (ex : plastique et matériaux absorbants), d'augmenter sa vitesse de production et la qualité de ses impressions (aussi bien en terme de couleur que de résolution), et de diminuer les déchets grâce à l'invention de la chambre à racle. Aujourd'hui, de plus en plus de journaux sont imprimés en flexographie, la majorité des cartons et des sacs alimentaires, et même la majorité des papiers-peints. Elle est la technologie qui progresse le plus depuis quelques années.

ii Description du procédé

Concernant la technologie d'aujourd'hui, le cylindre en caoutchouc à été remplacé par des clichés en photopolymère, facile à produire. L'apport d'encre sur ce cliché est fait depuis une chambre à racle par un rouleau appelé anilox (voir la figure 21). Il s'agit d'un rouleau dans lequel sont gravés des micropores permettant à l'encre d'être transportée. On pourra ensuite jouer sur la pression entre les rouleaux pour moduler la quantité d'encre déposée (le volume maximum étant fixé par les pores de l'anilox, nous ferons référence à cela à l'aide des désignations taille, volume ou linéature de l'anilox).

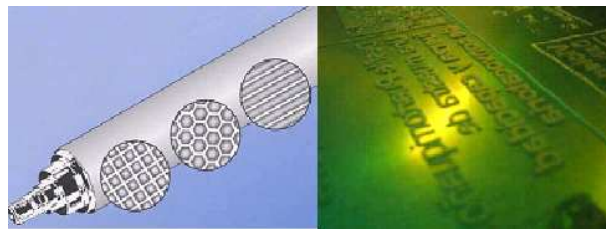


Figure 21 : En haut cylindre anilox avec les différentes alvéoles réalisables contenant l'encre, en bas cliché photopolymère pour la flexographie.

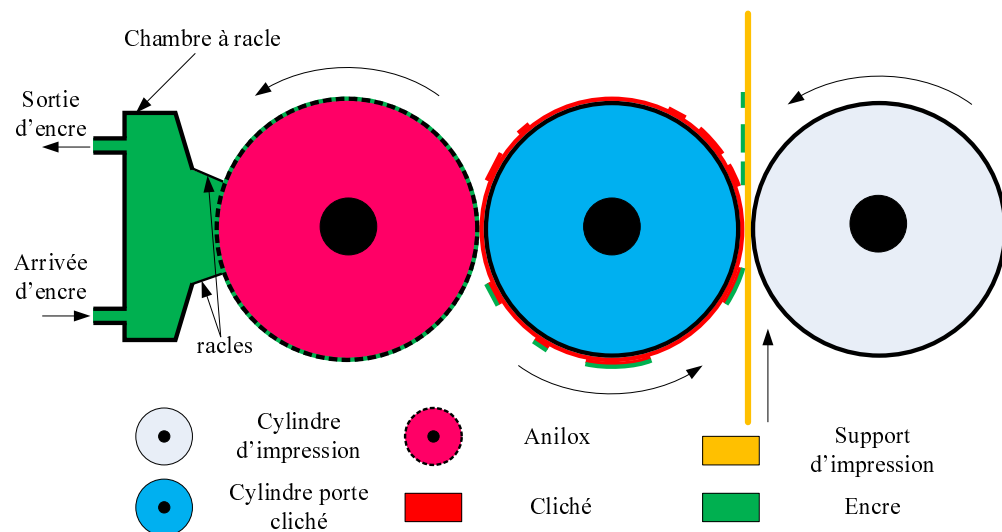


Figure 22 : Représentation d'un procédé flexographique.

Le fonctionnement actuel de cette technologie est représenté à la figure 22. On trouve une chambre à racle dans laquelle est injectée l'encre. Elle est ensuite transférée dans les pores de l'anilox. Puis, des racles (doctor blade en anglais) permettent d'aplanir le niveau d'encre. Elle est ensuite transférée sur les reliefs d'un cliché photopolymère qui va, enfin, être pressé sur le support d'impression pour y déposer l'encre. Comme

pour l'offset, plusieurs groupements sont mis les uns à la suite des autres pour des impressions couleurs.

iii Avantages et inconvénients à son utilisation

Si les industriels préfèrent de plus en plus cette technologie, c'est notamment grâce à ses différents avantages :

- faible viscosité et large gamme disponible des encres flexographiques (comparé à l'offset) qui permet un séchage rapide et donc une augmentation de la productivité ;
- forte cadence d'impression ;
- qualité de l'impression (couleur et résolution) ;
- impression sur tout support même ondulé (carton).

En revanche, comme toute technologie, elle a aussi quelques inconvénients :

- résolution moyenne (50 μ m de largeur de ligne et 100 μ m entre lignes).

iv Conclusion sur son utilisation

Concernant les encres conductrices, de plus en plus de travaux montrent que le procédé flexographique peut devenir la référence dans ce domaine. Ils sont cependant difficiles à se procurer car c'est un domaine actif de recherche pour les industries qui gardent confidentielles leurs avancées pour le moment. C'est seulement en assistant à des congrès industriels tel que LOPE-C que l'on peut se rendre compte de cela. Beaucoup de sociétés développent d'ailleurs des encres adaptées à la flexographie (Cabot, Sun, Novacentrix, VorbeckMaterials, PChem). En effet, sa cadence de production est tout à fait compatible avec les besoins des applications industrielles, la quantité d'encre déposée permet de répondre aux besoins de l'électronique imprimée (6 à 8 μ m) et la résolution des machines flexographiques peut atteindre 50 μ m [68]. Certains travaux montrent déjà la faisabilité de tag RFID [69] et certaines sociétés (comme Ask par exemple) utilisent déjà ce procédé industriellement pour l'impression de l'antenne de tags RFID. Tout cela fait de la flexographie un bon candidat pour notre application. Surtout que cette technologie est couramment utilisée pour l'impression de papier-peint.

II.3.f Héliographie

i Historique

Ce procédé, aussi appelé héliogravure, veut dire, étymologiquement parlant, gravure par le soleil. Ceci traduit en réalité l'origine de cette technologie. En effet l'invention de la photographie en 1839 est le départ de cette technologie. On réussit notamment, en 1852, à produire une plaque gélatineuse retenant l'encre proportionnellement à son degré d'exposition aux UV. Cela permettait ainsi d'imprimer une photographie avec différents niveaux de gris. Il fallut attendre 1895 pour que le peintre Klietsh désirant graver en creux, sur un cylindre métallique, une photographie, parvienne à ses fins. Il ouvrit alors la voie au développement de l'héliogravure industrielle aussi appelée rotogravure. Cette technologie connue ensuite un essor fantastique entre 1885 et 1910 pour imprimer en continu des rouleaux de papiers-peints notamment. La gravure chimique se développant, on réussit à produire des cylindres d'impressions gravés en creux. Ils permettent de recueillir l'encre puis, de l'apposer directement sur le papier grâce à un cylindre de contre pression.

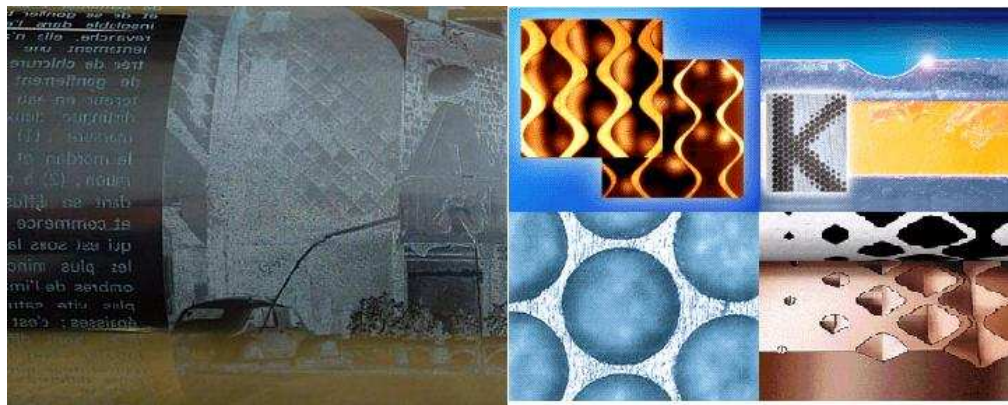


Figure 23 : Cylindre en cuivre gravé en creux pour l'héliogravure, comportant du texte et une illustration [70] à gauche et exemples de micro gravures réalisées dans un cylindre à droite.

L'héliographie, grâce aux développements de la technologie, va rapidement s'imposer, dès 1930, comme la technologie d'impression pour les grands tirages. La vitesse d'impression atteindra, dès 1980, 800m/min pour des laizes de plus de 3 mètres. De nos jours, le développement des technologies de gravure (stylet diamant vibrant ou laser) est tel, que l'on peut graver un cylindre avec une précision pouvant aller jusqu'à

25 μ m en largeur et quelques microns pour la profondeur. On peut voir à la figure 23 l'illustration d'un cylindre gravé et des formes basiques de gravures possibles.

Ces avancées ont permis d'obtenir des impressions de très bonnes qualités (la meilleure qui soit) avec une quantité d'encre choisie. Cependant, la gravure d'un cylindre coûte extrêmement cher et cette technologie d'impression n'est rentable que pour de très gros tirages (>250000). Elle demeure cependant la technologie reine pour l'édition de grand volume même si elle est graduellement remplacée dans le packaging (contenants alimentaires ou autres) par la flexographie.

ii Description du procédé

Le cœur de la technologie d'impression n'a pas évolué depuis ses débuts, à part les cadences de production, qui ont encore augmenté. On retrouve donc toujours les trois éléments principaux (figure 24) : l'arrivée d'encre et la racle, le cylindre gravé et le cylindre de contre-pression. Etant donné le peu d'éléments compris dans cette technologie, on comprend l'importance du cylindre gravé. Il doit, en effet, résister à l'usure et aux solvants de l'encre tout en garantissant un fonctionnement identique sur des tirages pouvant aller jusqu'à des millions d'exemplaires.

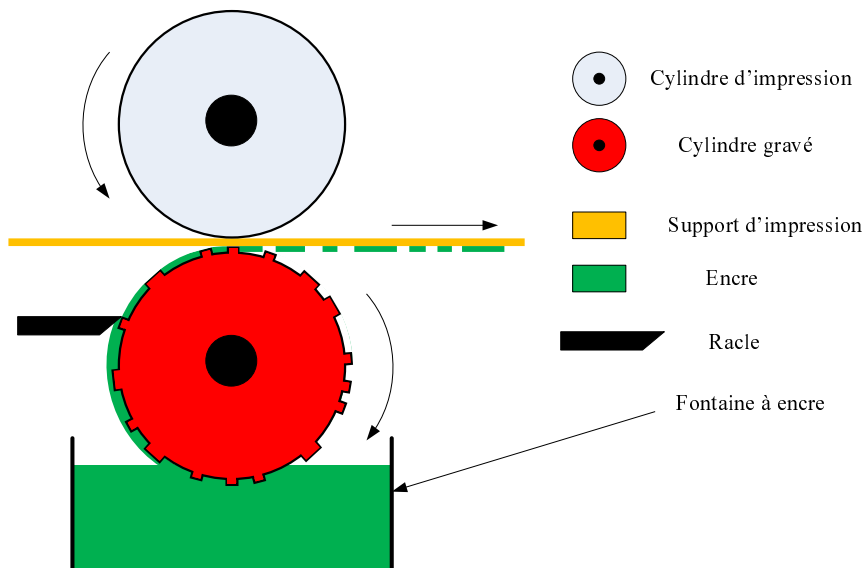


Figure 24 : représentation d'un procédé héliographique.

iii Avantages et inconvénients à son utilisation

Les avantages de cette technologie sont assez nombreux :

- qualité d'impression optimale (épaisseur jusqu'à $8\mu\text{m}$, résolution d'environ $25\mu\text{m}$) ;
- rentabilité pour des très grandes séries ;
- rapidité de production.

En revanche les défauts qu'elle a sont difficiles à surmonter

- coût de mise en place très important ;
- prototypage extrêmement onéreux.

iv Conclusion sur son utilisation

Au final, concernant les applications dans le monde de l'électronique imprimée, il n'y avait pas jusqu'à il y a moins d'un an de travaux réalisés à l'aide de ce procédé. C'est en se rendant à LOPE-C en 2011 que nous avons pu nous apercevoir que de nombreux industriels étrangers, coréens notamment, travaillaient sur la mise en place de ce procédé. Leur idée est de diminuer les coûts de prototypage à l'aide de nombreux modèles de simulation. Néanmoins, la mise en place d'une alchimie encre, cylindre et support est, comme nous avons pu le voir pour les autres technologies, difficile à trouver et demande de nombreux ajustements. Ces derniers représentent donc, pour l'héliographie, un coût de développement beaucoup trop important, en regard des bénéfices qu'apporterait cette technologie à l'heure actuelle. En effet, la tendance actuelle pour l'électronique imprimée n'est pas aux productions de séries supérieures à des centaines de milliers d'exemplaires. De plus, l'évolution de ces technologies rend vite obsolète des dispositifs fabriqués il y a peu et, s'éloigne donc d'avantage des points forts de l'héliographie. En revanche, si l'électronique imprimée évolue vers une fabrication de grande série en grande laize, l'héliographie pourra devenir la technologie d'impression phare. En effet, sa capacité à imprimer de fins détails ($25\mu\text{m}$ environ), à apporter une épaisseur d'encre importante (jusqu'à $8\mu\text{m}$) et sa capacité à produire très rapidement en feront alors la technologie à utiliser.

Ainsi, pour notre application, si des modèles de simulation permettaient à l'avenir de diminuer les coûts des essais et que le métapapier venait à se vendre en très grosse quantité, cette technologie pourrait alors être le meilleur choix. Malheureusement, pour l'instant, ce n'est pas le cas et nous ne disposons pas de moyens financiers suffisants pour son utilisation.

II.4 Conclusion et choix d'une technologie d'impression

Concernant le monde de l'impression, ces 5 technologies se livrent une bataille féroce sur un marché qui s'est porté en 2006, à 25 milliards d'euros pour le seul marché français. Comme beaucoup d'industrie, l'impression est actuellement en baisse d'activité (baisse de 17% en moyenne). On ne peut cependant pas dire que cela soit uniforme entre les technologies d'impression. En effet, comme on le voit sur la figure 25, la flexographie et les technologies numériques du type jet d'encre voient leur part de marché augmenter d'année en année. Au contraire l'offset et l'héliographie sont en net recul.

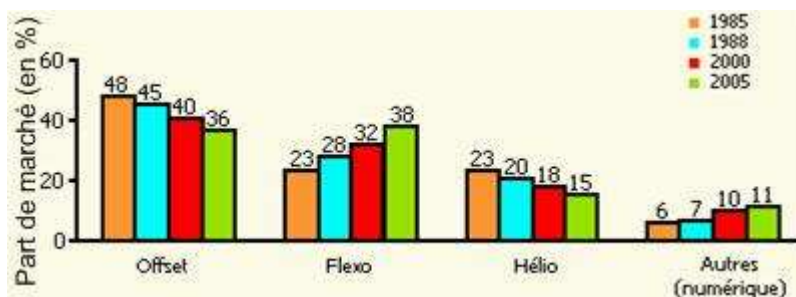


Figure 25 : Evolution des parts de marchés des principales technologies d'impression [71].

Concernant l'application métapapier, un choix doit être fait sur la technologie à utiliser. Des études comparant les différents procédés commencent d'ailleurs à voir le jour [69] [72] [73] [74]. Cependant, ces études ne font que comparer certaines technologies entre elles et parfois uniquement sur un point particulier. Nous apprenons ainsi que la répartition de l'encre le long d'une impression à de l'importance, et que le jet d'encre est, de ce point de vue, plus performant que la flexographie ou la sérigraphie. Nous avons aussi la confirmation du fait que la sérigraphie permet de déposer plus d'encre que l'offset mais avec moins de précisions. Seul [72] met en avant une technologie pour l'électronique imprimée du futur mais sans se baser sur des données chiffrées. Il convient donc de faire notre propre étude, sur la base des descriptions faites et des caractéristiques décrites dans les études citées, afin de sélectionner une technologie à utiliser en fonction des critères imposés par notre application.

Ces critères concernent trois caractéristiques principales : la vitesse d'impression, la résolution et la quantité d'encre déposée. Nous verrons dans la suite de ce document que la résolution à atteindre est d'environ 100 μ m et que la quantité d'encre

doit atteindre les 3 à 4 μ m. Le tableau 3 nous permet de comparer ces trois principales caractéristiques pour les 5 technologies présentées.

Tableau 3 : Tableau des principales caractéristiques des procédés d'impression précédemment évoqués. Les valeurs sont issues de [75] et [76]. Vert : attentes satisfaites; Orange : technologie limitante ; Rouge : technologie à exclure. (1) : réactualisé avec [69], (2) avec [73].

Procédé d'impression	Vitesse (en m ² /sec)	Résolution (en μ m)	quantité d'encre déposée (en μ m)
Sérigraphie	<10	100	jusqu'à 50
Flexographie	20	25 ⁽¹⁾	jusqu'à 8
Héliographie	60	<25	jusqu'à 8
Jet d'encre	<10	<10	jusqu'à 2
Offset	20	25 ⁽²⁾	jusqu'à 3

Nous avons attribué, sur la base du tableau 3 et ayant pris en compte nos spécifications ainsi que certaines perspectives, des notes à chaque technologie et pour chaque critère. En effet, une de ces perspectives est la diminution du coût de production en maillant le motif à l'aide de ligne très fine [77]. D'autres encore pourraient être la fabrication de motif passe haut nécessitant une résolution la meilleure qui soit, ou l'impression de SSF sur les fenêtres sans forte diminution de la lumière qu'elles laissent passer. Dans tous les cas, cela impose une résolution la plus faible qui soit et donc, seul le jet d'encre peut se voir attribuer la note maximale. De même concernant la vitesse d'impression, plus elle sera élevée et plus le procédé sera rentable pour de grosse série. Ainsi seule l'héliographie peut avoir la note maximale. En revanche, pour la quantité d'encre déposée, une fois dépassé les 4 μ m d'encre les possibilités d'aller loin au delà ne présentent pas d'intérêt pour l'application métapapier. D'où la note maximale pour toutes les technologies exceptés le jet d'encre et l'offset. L'ensemble de ces notes ainsi qu'une moyenne sont donnés dans le tableau 4

Tableau 4 : Note attribuée sur la base du tableau 3 à chacune des technologies.

Procédé d'impression	Vitesse	Résolution	Quantité d'encre déposée	Note moyenne
héliographie	1	0,75	1	0,92
Flexographie	0,5	0,5	1	0,67
offset	0,5	0,5	0,25	0,42
Sérigraphie	0	0	1	0,33
jet d'encre	0	1	0	0,33

Etant donné ces informations on voit bien que deux technologies sortent du lot : l'héliographie et la flexographie. En revanche comme nous l'avons dit, le coût de

développement de l'héliographie fait perdre de son intérêt en regard de l'état d'avancement actuel du projet. De plus, un autre facteur qui ne figure pas dans le tableau 4 est le fait que le CTP possède un exemplaire semi-industriel d'une machine d'impression flexographique que nous pouvons utiliser pour le prototypage. Ainsi, le choix, au regard de ces données et celles préalablement mentionnées, se portera donc sur la flexographie.

II.5 Substrats pour l'électronique imprimée

II.5.a Introduction

De nombreux substrats différents sont utilisés pour l'électronique imprimée. Les premiers à l'avoir été qui ne sont d'ailleurs pas flexibles, étaient le verre et le silicium. Ils sont encore utilisés aujourd'hui pour le prototypage, la recherche de performance, la création d'afficheurs à bas coûts, ou comme supports à fonctionnaliser (comme le verre des fenêtres). Aujourd'hui, l'électronique imprimée utilise en grande majorité des substrats plastiques types PET, PEN ou PI en raison de leur propriété de surface excellente. En effet, avec des encres conductrices « standards », le support doit être le moins absorbant et le moins rugueux possible, ce qui correspond bien à ces plastiques. Le PEN est d'ailleurs grandement utilisé en raison de sa stabilité dimensionnelle [78]. Au contraire, le papier apparaît comme un substrat difficile à utiliser pour l'électronique imprimée. En effet, il a une absorption de l'encre assez forte, un état de surface souvent très rugueux et il ne supporte pas les températures dépassant les 120 à 130°C. Pourtant, il possède des propriétés remarquables qui peuvent faire de ce substrat méconnu un atout formidable pour l'électronique imprimée. De nombreux travaux commencent d'ailleurs à en faire état [79][80][81]. Nous nous proposons dans cette partie de rappeler quelques généralités sur le papier et la façon dont on le produit. Nous verrons ensuite de quelle façon ce matériau peut parfaitement s'adapter à l'électronique imprimée et, avant de conclure, aborderons ses propriétés électromagnétiques.

II.5.b Fabrication du papier

Ce matériau, bien que couramment utilisé par l'ensemble des classes sociales depuis plusieurs centaines d'années, est encore extrêmement méconnu aujourd'hui par

le grand public. En effet, bien que sa fabrication relève d'un procédé industriel très vieux, les avancées technologiques permettent d'obtenir nombre de papiers différents à partir des mêmes matières premières que sont le bois et l'eau. C'est ainsi que souvent, sans s'en rendre compte, on utilise aujourd'hui ce « papier » pour écrire, payer, communiquer, se laver, se soigner, se protéger, embellir ses murs, etc.

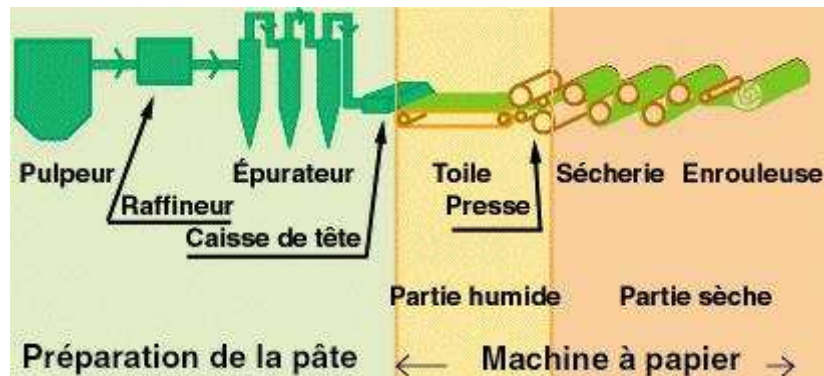


Figure 26 : Schéma de principe simplifié d'une usine de papier.

Sur la figure 26, on voit la chaîne de fabrication simplifiée du papier. Avant d'être mis dans le pulpeur (sorte de grand autocuiseur) avec une grande quantité d'eau et d'additifs, le bois est broyé. A la sortie du pulpeur, les morceaux de bois passent dans un raffineur qui permet de les broyer complètement jusqu'à l'obtention d'une pâte. En fonction du type et du nombre de raffinage, des additifs ajoutés, de l'essence de bois utilisée, la pâte peut posséder une multitude de propriétés diverses. Cette pâte est ensuite filtrée, afin de ne garder que les fibres les plus fines, puis étendue sur une toile à l'aide d'une caisse de tête qui contrôle la largeur et l'épaisseur du dépôt de pâte. La pâte étendue est composée à ce moment de plus de 80% d'eau, elle est ensuite successivement pressée et séchée afin de former la feuille de papier que l'on connaît. L'ensemble de ces étapes est très complexes et nécessite le contrôle de très nombreux paramètres. Quoiqu'il en soit c'est ainsi qu'il existe des papiers surfacés, pigmentés, couchés, frictionnés, apprêtés, satinés, crêpés et que chacun de ces types de papier peut encore se décomposer en une multitude de produits en fonction de paramètres tels que le grammage, la blancheur, la stabilité dimensionnelle, l'imprimabilité, l'opacité, la douceur, l'épaisseur, la rugosité etc. Il est à noter que l'on parle de carton lorsque le papier a un grammage supérieur à 224g/m² et que l'épaisseur est supérieure à 175 microns (d'où l'utilisation du terme « support cellulosique » dans le cas général papier/carton).

Les machines à papier récentes sont à la pointe de la technologie et peuvent produire jusqu'à 3200 tonnes de papier par jour. Pour cela, les machines sont plus grandes que trois terrains de football, contiennent plus d'acier que deux tours Eiffel et autant d'électronique que dans 5 airbus. Le procédé industriel est aujourd'hui bien maîtrisé et depuis l'arrivée du papier recyclé seule l'optimisation de processus, en vue d'une baisse de la consommation de matières premières et d'énergie, restait un domaine actif de recherche. En réalité une nouvelle révolution est en train d'avoir lieu pour le papier : sa fonctionnalisation notamment grâce à l'électronique imprimée.

II.5.c Le papier pour l'électronique imprimée

Nous avons vu que l'utilisation du terme « papier » sans précisions aucunes est trop générale pour vraiment signifier quelque chose. Pourtant, de nombreux travaux [40][41][82] se contentent de faire des essais sur papier sans forcément spécifier de quel type il s'agit, ou sans tenir compte du fait qu'il existe des papiers plus ou moins adaptés au procédé d'impression et à l'encre utilisée. La raison à cela est que beaucoup d'études [79][80][81] montrent l'intérêt de l'utilisation de supports cellulosiques et, de ce fait, des équipes de chercheurs en électronique tentent de produire des résultats sur ce support sans nécessairement bénéficier de l'aide d'expert papetier. Les atouts du papier sont en effet nombreux. Que ce soit son prix, qui en fait le substrat le moins cher possible, sa flexibilité, son absorption qui, si elle alliée à une encre spécifique permet un temps de séchage des encres court, sa maturité industrielle qui lui permet d'être modifié au gré des caractéristiques ciblées, son abondance dans les objets nous entourant, ses possibilités de recyclage et, enfin, sa parfaite adéquation avec les technologies d'impressions actuelles, toutes ces raisons font des supports cellulosiques de très bon candidats pour le développement de l'électronique imprimée.

Aujourd'hui, certains papiers [83] sont même spécifiquement développés pour répondre aux besoins de l'électronique imprimée associés à une technologie d'impression particulière. Par exemple, l'utilisation de micro-fibrilles de cellulose pourrait permettre au papier d'obtenir les mêmes propriétés que des plastiques (barrière à l'air, faible rugosité pour utilisation comme substrat dans l'électronique imprimée, etc.) [84]. Certains travaux [85] montrent cependant à quel point les propriétés du papier (rugosité et absorption notamment) ont un impact fort sur les performances d'une

impression et pourquoi on ne peut utiliser un simple « papier » comme substrat pour l'électronique imprimée. En effet, on observe globalement toujours la même tendance dans les travaux déjà cités, à savoir que plus le substrat est rugueux ou poreux, et moins bonne est la conductivité de l'encre. En général, la façon la plus simple d'y remédier est d'utiliser des papiers couchés qui ont subi un traitement de surface visant à réduire la rugosité à l'aide de différentes particules tel le calcaire ou différentes céramiques. Dans le cas de l'application métapapier, les papiers-peints traditionnellement utilisés sont couchés sur une face et laissés bruts sur l'autre. Ils pourraient donc éventuellement être utilisés tels quels.

Au final, quelle que soit l'application, il faut rechercher les meilleurs trios papiers/encres/moyens d'impressions permettant de favoriser l'impression et ses performances en fonction de celles visées et des contraintes imposées.

II.5.d Propriétés diélectriques des matériaux celluloseux et conclusion

Les propriétés de ces matériaux sont difficiles à trouver. En effet, la méthode la plus couramment utilisée pour mesurer la permittivité et les pertes d'un diélectrique est la méthode de la cavité résonnante. Or, cette méthode, bien que mise en place durant un stage au CTP [18], n'est pas la plus adaptée en raison de son imprécision pour des substrats de faible volume. Malgré cela, les paramètres électromagnétiques aux fréquences qui nous intéressent de différents papiers ont pu être estimés entre 1.5 et 4 pour la permittivité et entre 0.01 et 0.1 pour le facteur de pertes. Ces valeurs seront celles utilisées pour les simulations qui seront effectuées.

Nous avons donc pu voir quels substrats pouvaient être utilisés en électronique imprimée et nous avons pu comprendre pourquoi le papier est vraiment bien adapté à notre problématique. Enfin, après quelques informations sur la fabrication du papier, nous avons donné quelques détails sur son utilisation actuelle dans le monde de l'électronique imprimée.

II.6 Conclusions et perspectives

Nous avons brièvement décrit ce qu'est l'électronique imprimée. Il s'agit d'imprimer des encres particulières sur tout type de support afin de leur procurer des

fonctionnalités diverses. Nous avons pu voir qu'il existait deux types d'électronique imprimée : active ou passive. Bien que notre application, le métapapier, concerne la deuxième catégorie, nous avons décrit succinctement les deux en présentant les principaux composants ayant donné naissance à l'un ou l'autre à savoir les polymères pour la partie active et les nanoparticules métalliques pour la partie passive. Dans les deux cas, nous avons cité quelques travaux marquants faisant état des différentes réalisations possibles avec l'une ou l'autre des catégories.

Nous avons ensuite décrit le fonctionnement et l'historique des cinq technologies d'impression grands formats et à haute productivité existantes, à savoir le jet d'encre, la sérigraphie, l'offset, la flexographie et l'héliographie. Nous avons ainsi pu donner les principaux avantages et inconvénients de ces technologies telles qu'elles sont mises en application dans le monde de la papeterie tout en sachant que ces caractéristiques se retrouvent ou se retrouveront lors d'une utilisation pour l'électronique imprimée. Nous avons donc, après synthèse de leurs caractéristiques respectives, pu nous apercevoir que la meilleure des technologies à utiliser dans notre cas devrait être la flexographie. Cependant, il est important de préciser que si la quantité de métapapier devenait très importante, la rentabilité de l'héliographie lui permettrait de largement surpasser la flexographie. Il est aussi possible aujourd'hui de créer des chaînes hybrides où une partie de l'impression est réalisée avec un procédé puis le reste de l'impression avec un autre. Un exemple de ceci pourrait être que les détails les plus fins d'un motif soient imprimés avec du jet d'encre et le reste avec de la flexographie.

Enfin, nous avons justifié du choix du substrat qui, bien que choisi dès le début de la thèse, est un très bon choix. Nous avons en effet vu que le papier, de prime abord un matériau absorbant et avec une forte rugosité de surface pouvait être modifié pour devenir un meilleur substrat que le plastique traditionnellement utilisé. La modification la plus simple étant un couchage permettant de diminuer la rugosité de surface. Cette opération étant couramment utilisée dans l'industrie du papier, le surplus de coût occasionné ne modifie pas le fait que ce substrat soit le moins cher existant à l'heure actuelle. Ainsi, après avoir décrit succinctement la fabrication du papier pour comprendre à quel point il en existe des sortes différentes, nous avons donné quelques références sur ce qui se fait aujourd'hui en électronique imprimée sur papier. Nous avons au final donné les valeurs des caractéristiques électromagnétiques de ce substrat.

III Modélisation et création de nouveaux motifs

III.1 Introduction

Dans les chapitres précédents, nous avons exposé les critères qui nous ont permis d'arrêter un choix sur l'utilisation de SSF sur du papier avec une impression flexographique. Comme nous l'avons vu dans la partie I.4.c, les SSF sont des structures planaires, au design complexe, qui permettent de filtrer les ondes. Leurs performances dépendent de nombreux paramètres. La forme du motif va modifier les performances de la SSF en termes de sensibilité vis-à-vis de l'angle d'incidence et de la polarisation de l'onde [21], ainsi qu'en termes de largeur de bande(s) rejetée(s) dans le cas d'un filtre dichroïque. Le substrat va, quant à lui, avoir une influence principalement sur le niveau d'atténuation et sur la fréquence centrale de la bande de fréquence rejetée [86]. Enfin, l'encre, tout du moins sa conductivité et son épaisseur, va influencer uniquement le niveau d'atténuation. Le profil d'impression peut, quant à lui, provoquer un décalage fréquentiel en plus d'une baisse d'efficacité [87]. Il est donc essentiel de bien modéliser les SSF sur papier. C'est le sujet du présent chapitre.

Pour cela, de nombreuses possibilités existent. Certaines consistent à modéliser une SSF comme un circuit LC. La difficulté réside alors dans la transformation d'une géométrie en éléments capacitifs et inductifs à l'aide de formules approchées [88]. Aujourd'hui, cette méthode de simulation est utilisée uniquement pour les éléments dont la géométrie est simple afin d'obtenir des résultats rapides mais approchés [89][90].

D'autres possibilités, plutôt anciennes, nécessitent de manipuler les équations présentées dans le premier chapitre, en les discrétisant [91]. Or, les moyens informatiques sont, aujourd'hui, suffisamment performants pour pouvoir utiliser des simulateurs électromagnétique 3D sur des ordinateurs portables. Ces simulateurs sont basés sur différentes techniques : méthodes des moments, différences finies, éléments finis, équations intégrales ou diverses méthodes hybrides. Nous ne les passerons pas en revue ici, libre au lecteur de consulter [92] pour obtenir leurs descriptions, forces ou faiblesses. Le choix d'un logiciel de simulation commercial s'est porté vers CST Microwave Studio. Il utilise une méthode dite d'intégration finie, proche des méthodes de différences finies. Pour plus de précisions quand aux réglages effectués pour la simulation de SSF, le lecteur peut se reporter à l'annexe A.

Dans un premier temps, dans ce chapitre, nous définissons un cahier des charges du motif à développer. Nous voyons ensuite rapidement une revue de la littérature des motifs existants. Une fois les performances des meilleurs motifs mises en avant, nous tentons de créer des motifs innovants. Pour cela, nous utilisons dans un premier temps des algorithmes génétiques (AG). Nous tentons ensuite de créer des motifs innovants en juxtaposant deux motifs existants, avant d'en créer un en effectuant de nombreuses modifications sur un motif existant. Nous verrons au final quelles sont les performances post-optimisation de ce motif.

III.2 Cahier des charges du motif idéal

III.2.a Eléments de performances

Avant toutes choses, il faut établir un cahier des charges du motif idéal pour l'application visée. D'après la partie I.4.c, les principaux éléments de performance sont :

- l'insensibilité à la polarisation de l'onde et à son angle d'incidence ;
- le niveau d'atténuation maximum en bande interdite ;
- la(les) fréquence(s) filtrée(s) ;
- la bande passante.

Il est nécessaire d'être précis sur les attentes pour chacun de ces critères.

III.2.b Insensibilité à l'angle d'incidence et à la polarisation

Les ondes sont réparties de façon équivalente en ondes TE et TM. Le motif devra donc y être parfaitement insensible.

Ce n'est pas forcément le cas pour les angles d'incidences, comme le montre la figure 27, issue de simulations par lancer de rayon effectuées par [93]. De grands angles ne vont apparaître qu'une fois l'onde réfléchi plusieurs fois. Or, plus le nombre de réflexions augmente, plus la puissance du signal est faible car une partie de l'onde sera transmise ou diffusée à chaque réflexion. Ainsi, seul un nombre restreint de réflexions doit être pris en compte. Par exemple, dans le cas d'un système MIMO [94], qui représente de plus en plus de réseaux locaux sans fils, il faut prendre en compte au minimum trois réflexions pour acquérir plus de 95% de la puissance totale

potentiellement reçue en prenant en compte toutes les réflexions. Il paraît donc justifié, pour notre application, de filtrer tous les trajets ayant subi une, deux ou trois réflexions. Or, 3 réflexions correspondent, d'après la figure 27, à une prise en compte des angles d'incidences allant jusqu'à 80° .

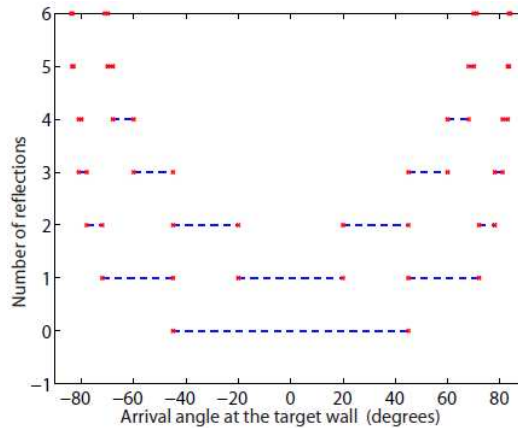


Figure 27 : Répartition des angles d'incidence sur un mur cible en fonction du nombre de réflexions du signal incident [93].

Les SSF devront donc être insensibles jusqu'à 80° pour filtrer l'ensemble des rayons traditionnellement pris en compte. Si elles n'atteignent pas cette insensibilité, le risque est double. En effet, lorsque l'angle d'incidence augmente deux phénomènes peuvent se produire. La fréquence ciblée n'est plus la fréquence filtrée car un décalage de la fréquence filtrée est observé au fur et à mesure que l'angle d'incidence augmente. L'autre possibilité est une diminution de l'atténuation maximale qui se produit indépendamment du décalage en fréquence. Cette dernière est d'ailleurs beaucoup plus difficile à limiter à l'aide du motif uniquement et il faut donc fixer une limite sur l'atténuation nécessaire.

III.2.c Atténuation nécessaire

Ainsi, concernant l'atténuation, là encore, des précisions doivent être apportées. Dans l'idéal, elle devrait bien évidemment être la plus grande possible mais, nous pouvons tout de même nous interroger sur la valeur minimale qu'elle doit prendre.

Bien entendu, la réponse est fonction des technologies visées. Prenons le cas où nous cherchons à réduire la distance couverte par un réseau WiFi pour des raisons de

sécurité. Dans ce cas, la formule simplifiée de l'affaiblissement par propagation, A , en espace libre est de la forme :

$$A = 20 \log(d), \quad (3.1)$$

où d est la distance. Ainsi, pour une atténuation A , provoquée par l'ajout d'une SSF, on peut en déduire un ratio entre les distances couvertes avec et sans SSF (d_2 et d_1). On obtient alors la figure 28 issue de l'équation (3.1) où :

$$d = \frac{d_1}{d_2}. \quad (3.2)$$

On observe donc qu'une atténuation de 20dB permet de réduire la distance de couverture d'un facteur 10, et qu'une atténuation de 30dB permet de réduire la distance d'un facteur 30.

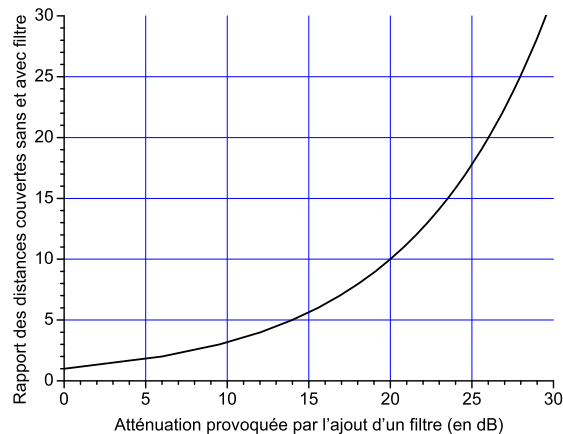


Figure 28 : Réduction de la zone couverte en fonction de l'atténuation provoquée par une SSF.

D'autres points qui concernent la couverture réseau, ou l'efficacité d'un réseau, peuvent être évoqués pour en tirer une valeur limite d'atténuation. [95] montre en effet, à l'aide de simulations de lancer de rayons, que pour obtenir un impact intéressant sur la réduction des interférences entre réseaux, une atténuation minimale de 20dB doit être atteinte. Au final, nous souhaitons une atténuation de 25dB avec une limite basse à 20dB. Cette dernière, d'après [95], doit être respectée pour des angles d'incidence allant jusqu'à 50° minimum. Au-delà, une atténuation supplémentaire viendra s'ajouter à cause des nombreuses réflexions et complétera l'effet de la SSF. En revanche, si la largeur de bande rejetée est faible, cette atténuation supplémentaire ne suffit généralement pas à corriger la perte d'atténuation, provoquée par le décalage de la fréquence filtrée suite à une augmentation de l'angle d'incidence. Il est donc important

de maintenir la fréquence filtrée à l'identique jusqu'aux 80° définis et de maintenir une atténuation minimale de 20dB jusqu'à 50°.

III.2.d Fréquences à filtrer et largeur de bande à rejeter

i Contexte

Le choix des signaux à filtrer s'est immédiatement porté vers les deux technologies de communication sans fil ayant de plus en plus d'impact aujourd'hui sur le grand public : la téléphonie mobile (GSM) et le WiFi. Les fréquences à filtrer sont donc celles utilisées par ces deux technologies.

Mentionnons que la stabilité dans le temps des fréquences autorisées pour chaque application est un paramètre clé de la viabilité du produit. C'est fort heureusement le cas. Quant à eux, même si les protocoles de communication évoluent périodiquement, cela se fait avec la conservation de la fréquence porteuse. Cela n'a donc pas d'impact sur le produit.

ii WiFi

Concernant le WiFi, l'ensemble des fréquences utilisées ainsi que leur répartition dans le monde sont données en fonction des technologies dans le tableau 5.

Tableau 5 : Tableau des différentes fréquences du WiFi.

Wifi 802.11b/g	2412-2484 MHz	Monde	Non compatible avec 802.11a
Wifi 802.11a	5170-5680 MHz	Europe, USA, Japon, Moyen Orient	Mise en place futur proche

De plus, pour des technologies comme le WiFi, les bandes libres sont rares et il est reconnu aujourd'hui que seules les bandes 2.45GHz, 5.5Ghz et 60GHz pourraient être utilisées. La bande 60GHz n'est pas encore utilisée, mais de nombreux travaux [96][97] montrent des capacités intéressantes pour des réseaux locaux à très courtes portée. Etant donnée cette portée (quelques mètres), et l'absorption importante provoquée par un quelconque obstacle à ces fréquences [98], cette bande de fréquence n'a pas lieu d'être prise en compte.

Nous ne nous intéresserons donc dans ces travaux qu'aux bandes WiFi soient 2.45GHz et 5.5GHz. Les largeurs de bande à rejeter qui sont associées sont respectivement de 3% et de 9.4%.

iii Téléphonie mobile

Pour le téléphone mobile le choix des fréquences est plus compliqué. En effet, depuis plusieurs dizaines d'années, les fréquences attribuées n'ont pas changées. Or, l'arrêt en 2011 de la télévision analogique a libéré du spectre et, bien entendu, les fréquences libres font l'objet de beaucoup de convoitise. Après de nombreuses années de discussions, un début d'accord semble être en vue. En effet, aujourd'hui, la 3G voit lentement le jour et s'est vu attribuer une nouvelle fréquence en milieu urbain (2.1GHz), en plus de sa possible utilisation sur les deux bandes existantes (0.9GHz et 1.8GHz). Il faut savoir qu'à chaque achat d'une bande de fréquence par un opérateur, celui-ci a l'obligation de couvrir une grande majorité de la population au bout d'un certain nombre d'années (15 ans en général). Aujourd'hui, pour la 3G, on arrive à expiration de ce délai fin 2013 et la carte de couverture reste encore pauvre pour certains opérateurs, comme le montre la figure 29.

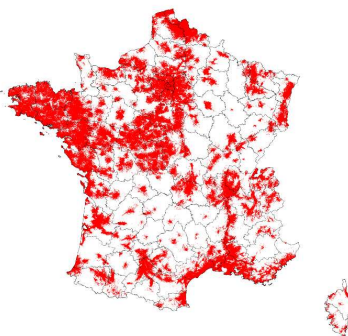


Figure 29 : Carte de la couverture 3G de SFR au 1er décembre 2009 soit quasiment 20ans après le lancement de la 3G en France.

Jusqu'ici, trois bandes sont associées à la téléphonie mobile, mais les choses vont se compliquer d'avantage car, à l'avenir, une bande pour les systèmes 4G verra probablement le jour autour de 2.6GHz en milieu urbain, ainsi qu'une autre autour de 0.8GHz en milieu rural. Ces bandes ne sont pas encore disponibles à l'achat, mais le seront probablement en 2011-2012, comme le montre le discours d'E. Besson, ministre de l'économie numérique, en janvier 2011 [99]. Après cela, chaque opérateur aura un

délai pour implémenter ce service et le fournir au public. On peut donc estimer une mise en circulation correcte de ces services d'ici à 2025 au mieux. Il a donc été décidé de ne prendre en compte que les fréquences des technologies actuelles ou d'un futur proche.

Les bandes de fréquences associées sont présentées dans le tableau 6 :

Tableau 6 : Tableau des différentes fréquences des téléphones portables et du WiFi (uplink = pour l'envoi des données depuis un mobile vers une station de base, downlink = pour la réception).

Désignation	Bandes de fréquences	Région	Commentaire
GSM 900	880-915 MHz (uplink) 925-960 MHz (Downlink)	Europe, Asie, Afrique, Océanie	En dehors des grandes agglomérations
GSM 850	824-849 MHz (uplink) 869-894 MHz (downlink)	Amérique	En dehors des grandes agglomérations
GSM 1800	1710-1785 MHz (uplink) 1805-1880 MHz (downlink)	Europe, Asie, Afrique, Océanie	En agglomération
GSM 1900	1850-1910 MHz (uplink) 1930-1990 MHz (downlink)	Amérique	En agglomération
3G 2100	1920-1980 MHz (uplink) 2110-2170 MHz (downlink)	Europe, Asie, Afrique, Océanie	En agglomération (en cours de mise en place)
3G 2100	1710-1755 MHz (uplink) 2110-2155 MHz (downlink)	Amérique	En agglomération
4G	790-862 MHz	France, ?	Milieu rural, futur lointain
4G	2500-2570 MHz (uplink) 2620-2690MHz (downlink)	France, ?	Milieu urbain, futur lointain

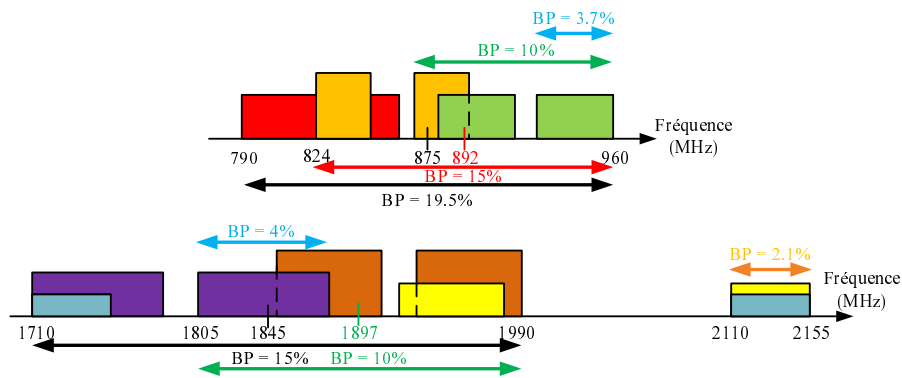


Figure 30 : Représentation graphique des bandes des téléphones portables. Les couleurs sont les mêmes que tableau 6. BP = bande passante par rapport à la fréquence centrale de chaque double flèche.

Comme on peut le voir, il y a beaucoup de superpositions de bandes en fonction des pays et des technologies. Une autre forme de présentation, figure 30, nous aide à y voir plus clair pour les bandes du téléphone portable.

On voit donc que deux à trois bandes peuvent être prises en compte pour le téléphone portable, indifféremment des pays. En effet, pour les fréquences autour de 900MHz, on voit sur la figure 30 qu'avec une SSF centrée sur 892MHz et d'une largeur de bande rejetée de 15%, on peut filtrer toutes les bandes hormis celle de la 4G qui

nécessiterait une largeur de bande rejetée de 19.5%. Concernant les fréquences autour de 1.8GHz, toujours à l'aide de la figure 30, on voit qu'une SSF centrée sur 1845MHz avec une largeur de bande rejetée de 15% serait capable de filtrer l'ensemble du service. Une troisième bande peut cependant être intéressante, pour la 3G à 2.1GHz avec une faible largeur de bande rejetée de 2.1%.

Comme le montre [21], la largeur de bande rejetée est en partie fonction de la largeur des pistes métalliques utilisées. Ainsi, pour arriver à des largeurs de bandes aussi importantes, il faudra très certainement augmenter le taux de couverture en matière et donc le coût de fabrication. Pour éviter cela, il est intéressant de faire la distinction entre *uplink* et *downlink*, car pour qu'il y ait rupture de service, une seule de ces deux bandes peut être filtrée. En revanche, le choix de l'une ou l'autre n'est pas anodin. En effet, le *downlink* (provenant donc des antennes relais) étant les ondes dont le grand public se méfie ; il pourrait être bon de les privilégier. D'autant plus que les barres réseaux qu'affiche le téléphone, principal point de démonstration pour un utilisateur final, sont fonction de ce lien. Mais, si cela est fait, et que l'atténuation supplémentaire provoquée par la SSF ne suffit pas à descendre la puissance de ce lien en dessous du seuil de sensibilité des téléphones, le protocole de communication est établi de façon à ce que le téléphone émette plus de puissance qu'avant, provoquant ainsi une surexposition des personnes. C'est l'inverse de ce que l'on veut faire. Ce constat ne se produit cependant que pour les personnes utilisant leur portable dans une enceinte qu'ils ont protégée, ce qui n'est pas censé avoir lieu.

A contrario, si l'on filtre l'*uplink*, la station de base confirmera au téléphone que la transmission est de bonne qualité et qu'il peut donc n'émettre que très peu de puissance. Or, tout ce qu'il émet est filtré. Ainsi, on bénéficie d'un double effet : une faible émission du téléphone et l'atténuation provoqué par la SSF. En revanche, certaines bandes *downlink* risquent de ne pas, ou moins bien, être filtrées. Un compromis doit donc être fait selon les pays et les bandes filtrées.

Un des compromis jugé intéressant dans ces travaux est celui représenté par les doubles flèches vertes sur la figure 30. Il nécessite l'utilisation d'une SSF bi-bande, d'une largeur de bande rejetée de 10% environ. Dans ce cas, pour les fréquences autour de 900MHz, le lien montant et descendant est filtré en Europe, Afrique, Asie et Océanie et seul le lien descendant est filtrée en Amérique. Cela convient parfaitement car les

normes d'émissions dans ces pays sont plus élevées qu'ailleurs, en Europe notamment, et il sera donc difficile d'arrêter le service. Dans ce cas, le lien descendant, à haute fréquence, est à privilégier. C'est ce qui est fait ici. Dans le cas des fréquences autour de 1.8GHz, le compromis proposé ici permet de filtrer les deux liens en Amérique. Pour l'Europe, l'Afrique, l'Asie et l'Océanie seul le lien descendant est coupé, ce qui reste suffisant pour la protection des personnes. Pour la troisième bande (2.1GHz), ce dernier compromis permettrait de filtrer le lien montant en Europe, Afrique, Asie et Océanie mais pas en Amérique. En fonction des besoins du marché, aux Etats-Unis notamment ou le besoin en termes de protection vis-à-vis des ondes se fait moins sentir, ce compromis pourrait être suffisant.

Mentionnons que, les niveaux d'émission pour cette troisième bande en Europe, Afrique, Asie et Océanie sont assez faibles et risquent de diminuer encore. Ceci pourrait rendre possible le filtrage complet du service en ne filtrant que le lien montant.

Dans le cas où ce compromis ne suffirait pas pour la troisième bande, il faudrait donc rajouter une troisième bande filtrée, centrée sur 2.1GHz environ, et de largeur de bande rejetée 2.1%. Dans un cas comme dans l'autre, un seul motif, bi ou tri-bande, pourrait à priori suffire à filtrer les ondes du téléphone portable dans le monde.

Dans le cas où la largeur de bande rejetée avec les SSF n'arriverait pas à atteindre celle désirée, il faudrait faire la distinction entre le marché américain et le reste du monde. Dans ce cas, les doubles flèches bleues sur la figure 30, accompagnées de la double flèche orange pour la bande à 2.1GHz, représentent une solution pour l'ensemble du marché hors Amérique, et permettent de descendre à 4% maximum la largeur de bande à rejeter.

III.2.e Synthèse

Pour conclure ce cahier des charges un résumé s'impose. Nous cherchons donc un motif de SSF :

- insensible à la polarisation de l'onde ;
- insensible à l'angle d'incidence de l'onde jusqu'à 80° ;
- avec un niveau d'atténuation supérieur à 20dB (25dB si possible jusqu'à 50°) ;
- avec le minimum de matière conductrice (pour des raisons économiques évidentes).

Ce motif, en plus des caractéristiques citées, doit être capable de filtrer différentes bandes de fréquences avec différentes largeurs de bandes rejetées et ce en fonction de plusieurs cas. Une synthèse de tout cela est donnée dans le tableau 7.

Le premier chapitre nous permet de comprendre que créer un seul motif pour satisfaire l'ensemble de ce cahier des charges est difficilement réalisable. Nous allons donc chercher deux motifs (d'aspect différent ou non) capables pour l'un de s'occuper des bandes du téléphone portable (motif bi-bande ou tri-bande), et pour l'autre de s'occuper des bandes WiFi (motif bi-bande).

Tableau 7 : Synthèse des bandes de fréquence à rejeter en fonction des technologies.

		WiFi		GSM	
		Fréquence de coupure	Largeur de bande rejetée	Fréquence de coupure	Largeur de bande rejetée
Cas parfait	F1	2448MHz	3%	895MHz	19.5%
	F2	5425MHz	9.4%	1845MHz	15%
	F3			2132MHz	2%
Meilleur des cas réalistes	F1			914MHz	10%
	F2			1897MHz	10%
	F3				
Pire des cas envisageable	F1			942MHz	3.7%
	F2			1842MHz	4%
	F3			2132MHz	2%

III.3 Motifs existants

III.3.a Revue de la littérature

Avant de s'attaquer à la création de nouveau motif de SSF, il est important de savoir si de tels motifs n'existent pas déjà. En effet, de nombreux motifs bi-bandes ont déjà été présentés à la communauté scientifique.

En premier lieu, les formes fractales (type triangle de Sierpinski, étoile de Koch, etc.) sont souvent utilisées [100][101][102]. L'utilisation de forme plus classique, que l'on modifie à l'aide de la théorie des fractales, donne aussi beaucoup de motifs bi bande [103][104]. En revanche, tous ces motifs présentent une sensibilité à l'angle d'incidence dès l'apparition d'une seconde bande.

Une autre approche, qui ne peut malheureusement pas être envisagée dans notre cas, est la superposition de plusieurs couches de motifs ne présentant qu'une bande de réjection, séparées par une distance suffisante pour qu'aucune interaction entre les

couches n'apparaissent [105]. Le travail se rapprochant le plus de ce type de construction [106] utilise des motifs très simples, comme une grille, un filtre passe-haut, et des patches, un filtre passe-bas, assemblés de chaque côté d'un substrat pour obtenir un comportement passe-bande. De même, des travaux plus récents [107] reprennent le principe avec des fractales mono-bandes pour former un filtre-passe bande bi-bande. Dans le cas où l'épaisseur entre les deux couches n'est pas suffisante, comme avec une feuille de papier, les possibilités de création de nouveaux motifs sont nombreuses mais très difficiles à mettre en place. En effet, étant donné l'inexistence de méthodologie connue et la quantité d'interactions entre motifs, la conception des motifs est complexe. De plus, la réalisation est aussi difficile car elle nécessite un très bon repérage entre le recto et le verso du substrat ce qui est difficile à obtenir dans le cas d'une machine d'impression.

A l'inverse, au lieu de perturber un motif à l'aide d'un autre placé dans un autre plan, d'autres travaux appliquent une perturbation dans le même plan à des motifs existants pour créer une deuxième bande [108]. Ces travaux montrent d'ailleurs que les performances du motif final peuvent être aussi bonnes que celles du motif de base en termes d'insensibilité à l'angle d'incidence. Cette voie paraît donc intéressante.

Enfin, d'autres travaux utilisent des éléments localisés, type L ou C, permettant d'obtenir un motif aux propriétés désirés [109]. Cela est totalement inadapté à la fabrication d'un papier-peint.

De toutes ces façons de faire, nous avons extrait des motifs existants qui sont spécialement dédiés à l'utilisation dans les bandes GSM [110], WiFi [24] ou les deux en même temps [22]. Pour plus de simplicité nous désignerons [22] par l'appellation « motif ETRI », [110] par l'appellation « motif carré et croix » et [24] par l'appellation « motif Mitsubishi ». Ces trois motifs, au comportement fréquentiel proche de celui recherché, sont représentés sur la figure 31. Ils méritent d'être examinés plus en détails. Pour cela, des simulations ont permis d'évaluer leurs performances.

III.3.b Simulations

Toutes les simulations de ce chapitre sont effectuées sans substrat et avec un conducteur parfait. L'adaptation au substrat papier et à son support ne donnant lieu qu'à une légère modification des dimensions du motif, seules ces dernières seront données au

chapitre V. De même, comme nous l'avons vu dans le cahier des charges, une atténuation supérieure à 20dB étant souhaitable, les performances en termes de largeur de bande rejetée seront toutes affichées pour une valeur de transmission à -20dB. Enfin, afin de comparer les différents motifs entre eux, toutes les largeurs de conducteurs seront identiques et de valeur 1mm. Une augmentation de cette valeur résulte en une augmentation des performances en termes de largeur de bande rejetée et inversement. Même si une fois imprimé, le motif subit une baisse de performance, elle sera la même pour tous. Nous sommes donc bien à même avec ces conditions de sélectionner le plus performant. Les deux fréquences utilisées seront celles du GSM : 0.9GHz et 1.8GHz. Dans le cas du motif ETRI, une troisième bande peut exister : 2.45GHz.

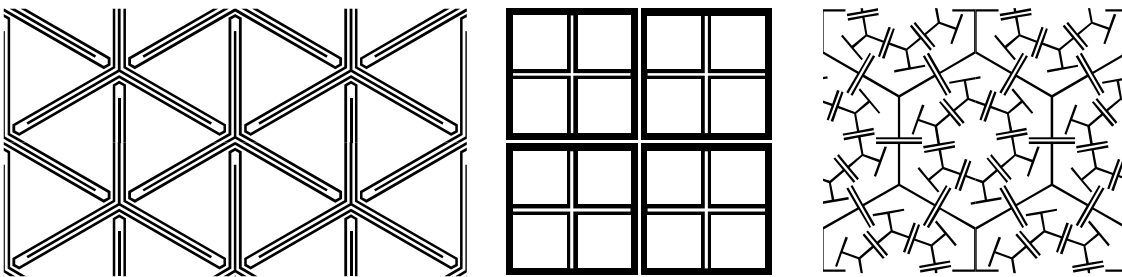


Figure 31 : Représentation des motifs aux performances proches de celles recherchées. De gauche à droite : motif ETRI, motif « carré et croix » et motif Mitsubishi.

Tableau 8 : Résumé des performances des 3 motifs figure 31.

Nom du motif	ETRI	Carré et croix (théta = [0-80°])	Mitsubishi
Différence TE/TM pour 0.9, 1.8 et 2.45GHz (pour théta = 0)	Moyenne (2.92%)		Grande (7%)
	Grande (6.36%)		Faible (0.35%)
	Moyenne (2.32%)		
Sensibilité à l'angle d'incidence pour 0.9GHz, 1.8GHz et 2.45GHz : théta = [0-60°]	Parfaite en TE et TM (0.83 et 0.4%)	Bonne en TE (1%) et mauvaise en TM (6%)	Parfaite en TE (0.41%) et moyenne en TM (3.84%)
	Parfaite en TE (0%) et mauvaise en TM (9.3%)	Mauvaise en TE (6.57%) et parfaite en TM (0.16%)	Mauvaise en TE (6.4%) et moyenne en TM (3.74%)
	Mauvaise en TE et TM (6.3 et 27.7%)		

Un résumé des simulations de ces motifs, présentées sur la figure 32 et la figure 33, pourrait être le tableau 8. On voit que le motif carré et croix est totalement insensible à la polarisation. Le motif est doublement symétrique ; il ne peut donc pas y avoir de différence entre TE et TM. Au contraire, on voit que la première bande du motif Mitsubishi et la deuxième du motif ETRI, sont particulièrement sensibles à la polarisation. On voit aussi qu'hormis pour la première fréquence du motif ETRI, la

sensibilité à l'angle d'incidence pour l'ensemble des autres bandes est moyenne ou mauvaise. Elle est supérieure à 3.74% minimum et peut même aller jusqu'à 27.7% dans le cas de la troisième bande du motif ETRI. On comprend alors rapidement que cette bande n'est pas applicable à un système réel.

Pour ces trois motifs, dont les performances semblent correspondre à nos attentes, une vue plus détaillée de l'évolution de leurs performances en fonction de l'angle d'incidence est requise. On peut la trouver sur la figure 33.

Au final, comme le montrent ces résultats, les motifs existants ne remplissent pas complètement le cahier des charges. En effet, sur la figure 33, chaque motif passe en dessous de la limite fixée. Elle correspond au meilleur cas réaliste défini dans le cahier des charges car les motifs ne sont que bi-bande, pour le motif ETRI, la troisième bande ne peut se régler à 2.1GHz lorsque les deux premières sont réglées à 0.9 et 1.8GHz. On retrouve d'ailleurs sur ces courbes le fait que la troisième bande du motif ETRI est très peu performante. Elle n'atténue plus de 20dB que pour une incidence normale en TM et que pour des angles d'incidence inférieurs à 30° en TE. On voit aussi, qu'excepté pour le motif carré et croix, toutes les largeurs de bande rejetée sont loin de satisfaire les attentes moyennes. Cependant, bien qu'il soit plus performant que les deux autres, le motif carré et croix ne répond aux attentes, qu'en termes de largeur de bande rejetée, et ce que pour la première bande de fréquence en TE et, en TM, pour des angles d'incidence inférieure à 40°.

De plus, le taux d'occupation en matière conductrice est d'environ 20% pour le motif Mitsubishi et ETRI, et de 31% pour le motif carré et croix. On voit donc que, bien qu'il soit le plus performant sur tous les points évoqués jusqu'ici, le motif carré et croix présente un défaut, au regard des deux autres, concernant son prix de fabrication.

Il convient donc d'essayer de trouver un motif avec de meilleures performances, qui, si possible, répondent à l'ensemble des attentes, dont celle de posséder un taux d'occupation de matière conductrice inférieur à ceux des motifs présentés ou, d'environ 20% maximum.

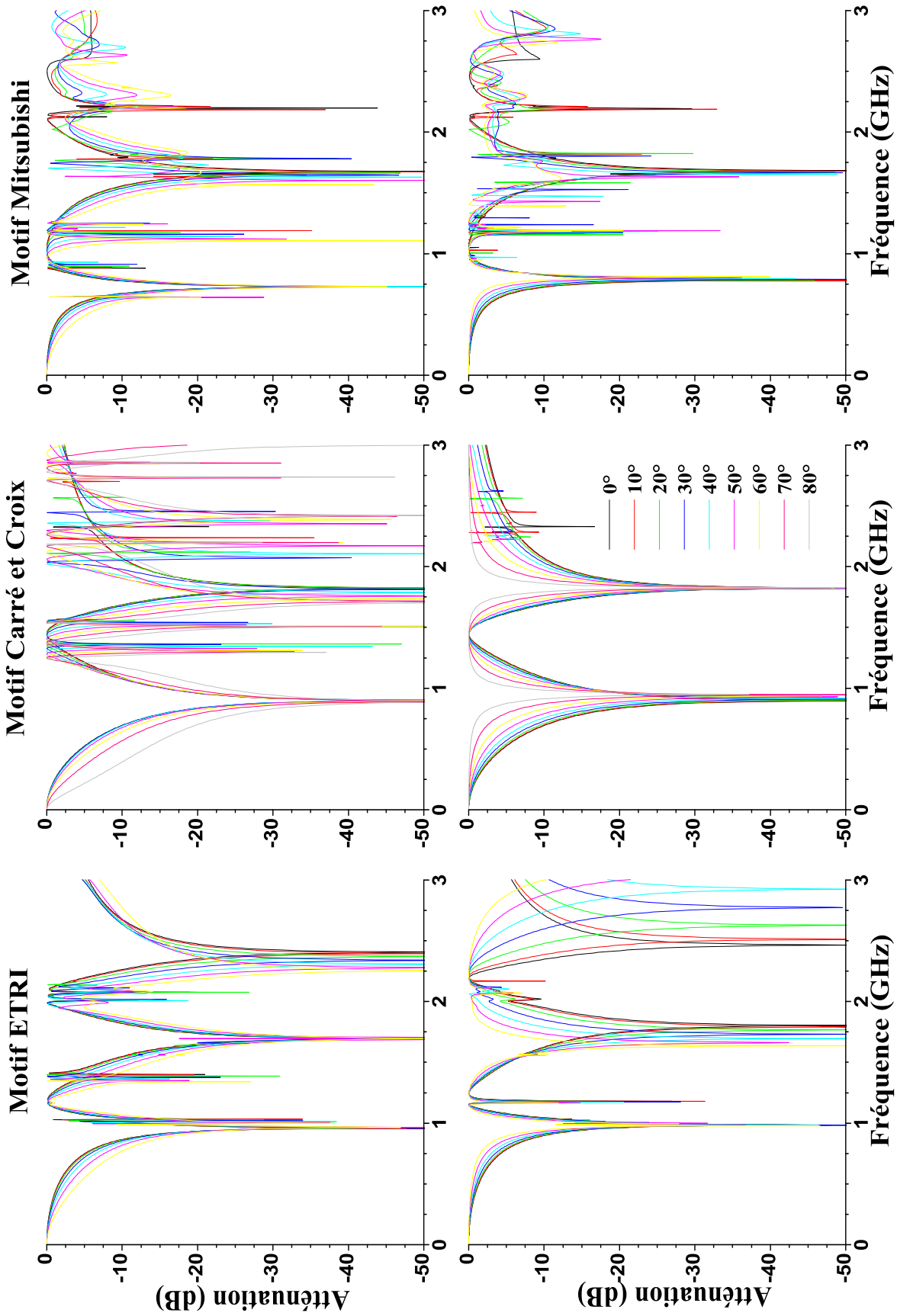


Figure 32 : Simulations pour les trois motifs présentés figure 31 (de gauche à droite : [34], [114], [36]). Polarisation TE en haut et TM en bas et pour chaque graphe variation de l'angle d'incidence entre 0 et 60 ou 80°.

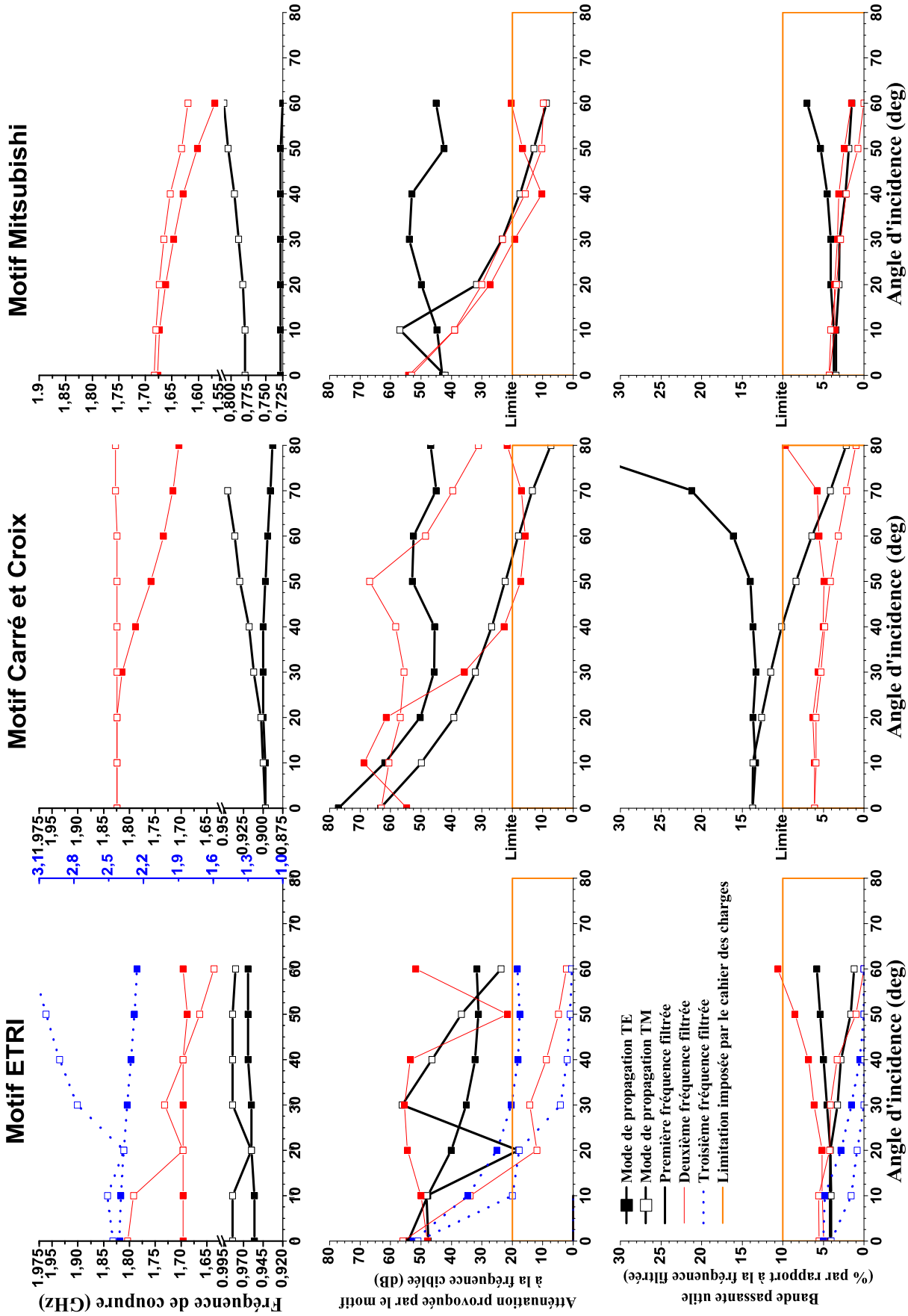


Figure 33 : Analyses des résultats précédents pour une polarisation TE, TM, pour toutes les fréquences de coupure et en fonction de la limite imposée par le cahier des charges: fréquence filtrée, atténuation et largeur de bande rejetée en fonction de l'angle d'incidence.

III.4 Création de nouveaux motifs par Algorithme génétique

III.4.a Présentation de l'algorithme génétique

i Définition

Une voie abordée est l'utilisation d'algorithme génétique (AG). En effet, de nombreux travaux montrent que l'utilisation d'AG pourrait permettre la création de nouveaux motifs. Que ce soit un programme qui construit un empilement de couches de SSF sélectionnées à partir d'un catalogue de motifs connus [111][112] ou qui construit de toutes pièces un motif [113][114] ou qui optimise des motifs existants [115], le principe est le même. Pour mieux comprendre cette technique expliquons ce qu'est un AG.

Un AG est un programme informatique qui imite les mécanismes de l'évolution naturelle pour résoudre des problèmes d'optimisation [116]. Les problèmes sont alors résolus par un procédé évolutif qui sélectionne une solution satisfaisant à des critères bien définis mais non pas la meilleure. En effet, il s'agit d'un algorithme stochastique qui renvoie une solution approchée répondant à l'ensemble des critères fixés. Les AG sont particulièrement indiqués lorsque l'espace de recherche est grand ou qu'il n'est pas nécessaire de trouver la solution optimale ou encore dans les problèmes à objectifs multiples [117]. Dans le présent cas, ces trois critères sont rencontrés.

Concernant le déroulement de l'algorithme qui est présenté à la figure 34, on commence par générer aléatoirement une population initiale de plusieurs individus ou chacun représente une solution possible au problème à résoudre. Cette population est tout d'abord évaluée et l'on en extrait les meilleurs individus, appelés parents, répondant le mieux au problème. On parlera de choix par élitisme. D'autres individus sont ensuite sélectionnés par des procédés divers afin de former une population de parents. Cette dernière donnera lieu à une nouvelle population de descendants, opération que l'on nommera croisement, née du mélange de leurs caractéristiques. Celles-ci sont codées sous formes numériques et sont nommées gènes. L'ensemble des gènes, quant à lui est nommé chromosome. Les opérations de sélection sont à nouveau opérées sur

cette nouvelle population. Le but étant que, générations après générations, des individus de plus en plus adaptés au problème apparaissent jusqu'à ce que l'un d'entre eux réponde de façon suffisante à l'ensemble des critères d'évaluation du problème. Pour s'assurer que la convergence se fait vers un extrema global et pas un local, des mutations sont appliquées de façon aléatoire sur la population de descendant. Afin de quantifier la performance de chaque individu, une note d'évaluation leur sera attribuée à l'aide d'une fonction de coût permettant ainsi de classer facilement chaque individu.

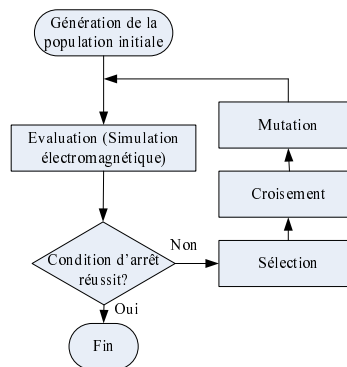


Figure 34 : Algorithme génétique utilisé.

ii Paramètres de l'AG utilisé

Comme nous pouvons le voir sur la figure 34, l'évaluation des individus, donc des motifs, est réalisée par le logiciel de simulation électromagnétique CST Microwave. En revanche, la gestion de l'algorithme est effectuée par Matlab, étant donné que CST Microwave ne peut pas paramétrer la création ou non de matière. Les modalités et probabilités de sélection, de croisement et de mutation (facteurs internes propres aux AG) sont réglés de façon à obtenir une convergence stable et rapide [118]. En effet, l'adaptation aux SSF du programme développé par [118] pour les antennes a été réalisée dans le cadre d'un stage de fin d'étude [119] dirigé en partie par l'auteur.

Dans le cas présent, un chromosome correspond à un motif, un gène à un pixel de matière et la position de ce pixel dans le motif à ce que l'on appelle locus. La valeur du gène indique la présence (ou non) de matière à une position.

La figure 35 illustre la composition des gènes d'un individu pour trois situations différentes. Dans le cas (a), un seul axe de symétrie (axe x) est utilisé pour réduire le nombre de gènes par 2. Dans la situation (b), un second axe (axe y) permet de réduire le nombre initial par 4. Enfin, en (c) un troisième axe de symétrie orienté selon une

diagonale réduit davantage le nombre de gènes. Physiquement, à partir de deux symétries, on impose une insensibilité vis-à-vis de la polarisation de l'onde. En effet le champ électrique sera perturbé de la même façon qu'il soit dirigé suivant l'axe x ou y .

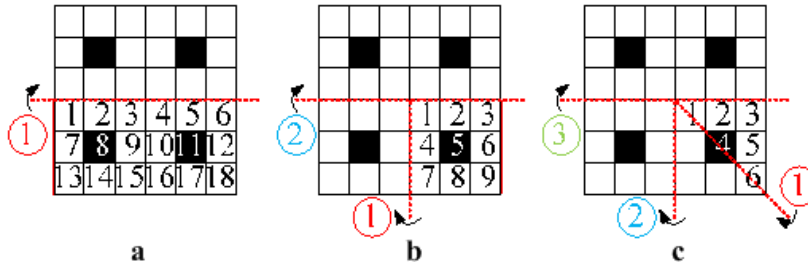


Figure 35 : Schéma d'un individu, emplacement des gènes et nombre de ceux-ci en fonction du nombre d'axes de symétrie utilisés. (a) 1 axe. (b) 2 axes. (c) 3 axes.

Le nombre de gènes utilisés est un paramètre important car plus il est grand, meilleure est la définition du motif et, potentiellement, meilleures pourront être ses performances. En revanche, s'il l'est trop, le temps de simulation deviendra rédhibitoire. L'importance de l'utilisation de symétries est donc bien réelle car, pour trois axes, elle permet de réduire le nombre de gène de N^2 à :

$$\text{Nb de gènes} = \begin{cases} \frac{N^2}{8} \left(1 + \frac{2}{N}\right) & [N \text{ pair}] \\ \frac{(N+1)^2}{8} \left(1 + \frac{2}{N+1}\right) & [N \text{ impair}] \end{cases} \quad (3.3)$$

La taille physique du motif élémentaire (pixel de matière) est aussi un paramètre important qui va jouer sur la taille finale du motif (donc indirectement sur la puissance de calcul requise) et sur ses performances. Un compromis est fait entre la précision désirée, la fréquence visée et les capacités de calcul disponibles. En effet la structure résonnante la plus simple étant un carré de longueur $\lambda/2$ de côté, on définit la taille du pixel par :

$$L = \frac{ac}{2f_{\min \text{ recherchée}} N} \quad (3.4)$$

où a est un facteur permettant le réglage de l'encombrement du motif ($a \in]0,1]$), $f_{\min \text{ recherchée}}$ est la fréquence recherchée (ou fréquence basse recherchée dans le cas de motif bi-bande) et N est le nombre total de gènes (donc de cellules élémentaires). Ainsi,

lorsqu'un encombrement minimum est requis, a prendra des valeurs faibles. De même, lorsqu'une précision importante est requise, L doit être faible donc N important.

Les paramètres internes propres à l'AG utilisés pour la simulation sont conformes à l'état de l'art et permettent la convergence. Ils sont fournis dans le tableau 9.

Tableau 9 : Paramètres internes de l'algorithme génétique.

Paramètre	Valeur
Population initiale	30 individus
Probabilité de croisement	0,6
Probabilité de mutation	0,01
Probabilité de sélection par élitisme	0,1

iii Fonctions de coût

Les fonctions de coût sont les critères à partir desquelles on choisit et conserve les meilleurs individus (ceux se rapprochant le plus des critères souhaités).

Une première fonction de coût va relever les fréquences de chaque pic d'atténuation et leur amplitude et les comparer aux valeurs souhaitées. Ceci sera traduit en une note attribuée à chaque individu, note d'autant plus élevée que les valeurs sont proches de celles désirées. Les individus ayant une note supérieure à un seuil passeront des évaluations supplémentaires quant à leur sensibilité vis-à-vis de l'angle d'incidence. Un bonus ou un malus sera ainsi ajouté.

Une seconde fonction de coût porte sur l'évaluation de la quantité de matière. Cette fois-ci, de façon très simple, l'AG ne sélectionne que les individus dont le nombre de gènes égal à 1 est inférieur à une limite fixée. On peut ainsi facilement imposer une limite à partir de laquelle les motifs sont considérés trop coûteux.

Mentionnons que d'autres fonctions de coût pourraient à terme être ajoutées sous Matlab comme la largeur de bande rejetée de chaque pic, ce qui ne peut être fait directement dans CST Microwave. Dans le cas des présents travaux, cela n'a cependant pas été fait.

III.4.b Principaux résultats

Les résultats ont été obtenus avec un ordinateur équipé d'un processeur Intel Core 2 Duo cadencé à 2.3GHz avec 1 Go de mémoire. Bien que la puissance de calcul

de cet ordinateur soit faible, elle permet néanmoins d'obtenir des résultats dans un laps de temps acceptable : quelques heures. L'utilisation d'un PC plus puissant disposant de 8Go de mémoire permettrait de diminuer d'un facteur 2 à 3 les temps de calculs. Toutes les simulations ont été effectuées sans substrat avec des matériaux conducteurs parfaits.

On observe sur la figure 36 un exemple de résultats obtenus pour le cas mono-bande (0,9GHz) comportant 15^2 pixels de 11 mm de côté chacun. Le schéma du motif montre une cellule élémentaire (à gauche) ainsi que la juxtaposition de 9 cellules. Les parties gris foncé du schéma sont les pixels conducteurs. La puissance transmise à travers une SSF de dimension infinie en fonction de la fréquence est également montrée sur la figure 36. Trois courbes correspondant à des angles d'incidence par rapport à la normale de 0° , 30° et 60° sont représentées. On constate que même avec un angle d'incidence important (60°), le centre de la bande rejetée ne se décale que de 25 MHz (2.7%). Cela se traduit par une atténuation supérieure ou égale à 20 dB à 0,9 GHz pour une variation d'angle jusqu'à 60° . La quantité de matière est inférieure à 30%. Notons aussi que ce motif est indépendant de la polarisation.

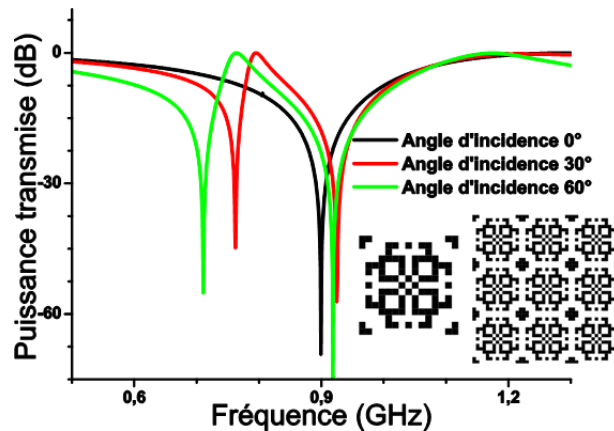


Figure 36 : Cellule élémentaire obtenue pour le cas mono-bande, juxtaposition de 9 cellules et courbes d'atténuation d'une SSF infinie pour 3 angles d'incidence : 0° , 30° et 60° . $N=15$, $L=11$ mm. Durée de simulation : 6h.

On observe aussi sur la figure 36 l'apparition d'un autre pic d'atténuation non désiré se situant entre 0,7 et 0,8 GHz pour les angles de 30° et de 60° . Nous attribuons l'apparition de ce pic à la présence de pixels inutiles qui, lorsqu'ils sont agglomérés par la juxtaposition de la cellule élémentaire, ou tout simplement par la construction, forment un motif résonnant à plus haute fréquence mais aussi très sensible à l'angle d'incidence du fait de l'éloignement entre deux agglomérés identiques. Un raffinement

supplémentaire du motif obtenu devrait être mis en place pour éliminer ces pics. En revanche, bien que diminuant légèrement la quantité de matière à utiliser, il serait coûteux en temps de calcul et n'augmenterait pas directement les performances du motif trouvé sauf si les fréquences rejetées ne doivent absolument pas l'être.

Pour le cas de la structure bi-bande, les contraintes de temps de calcul et de limitations mémoire ne nous ont pas permis d'obtenir une finesse suffisante d'une cellule élémentaire répondant à tous les critères souhaités. Pour ces premiers résultats, nous avons choisis de ne pas imposer de critères sur l'insensibilité à l'angle d'incidence. Ainsi, nous avons cherché à obtenir une structure bi-bande (0,9 et 1,8 GHz) possédant une bonne atténuation à incidence normale uniquement.

Les résultats obtenus sont illustrés à la figure 37. Nous pouvons voir que l'AG converge vers un motif adéquat, mais il est cependant sensible à l'angle d'incidence. Les pics d'atténuation sont centrés sur 0.8775 et 1.8025 GHz et les largeurs de bande à -20dB d'atténuation sont respectivement de 95MHz et de 145MHz soit 10.8% et 8%. Pour produire un motif de meilleure qualité, un passage à $N=30$ et un réglage de L à une taille adaptée est nécessaire mais irréaliste étant donné les temps de calculs.

Ce type de résultats est concordant avec divers travaux menés pour des applications différentes : surfaces hautes impédances [120] ou pour filtrer des fréquences différentes [121]. En effet, [121] décrit la création d'une SSF bi-bande à 20 et 30GHz sensible à l'angle d'incidence mais avec une largeur de bande rejetée élevée (15 à 25%). L'utilisation d'une fréquence plus élevée et d'un nombre de cellule sensiblement égale au nôtre ($N=16$) leur permet de travailler avec un L beaucoup plus faible que nous et d'imposer ainsi une contrainte supplémentaire.

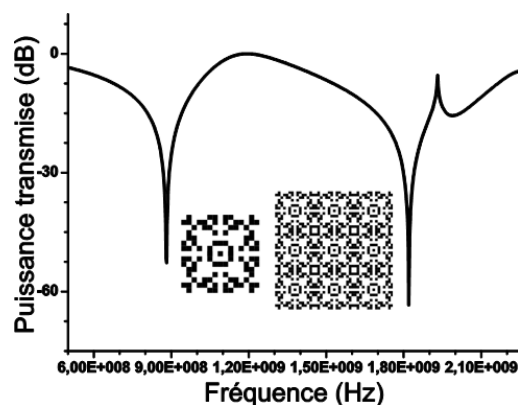


Figure 37 : Cellule élémentaire obtenue pour le cas bi-bande, juxtaposition de 9 cellules et courbe d'atténuation d'une SSF infinie à incidence normale. $N=15$, $L=11$ mm. Durée de simulation : 4h.

III.4.c Conclusion sur la création de motifs par algorithmes génétiques et perspectives

Comme nous l'avons compris, ces outils peuvent être très puissants pour la création de motifs si leur exécution peut se faire avec les ressources informatiques adéquates. Malheureusement certains problèmes purement informatiques sont survenus régulièrement dès que N était supérieur à 15 à cause d'un problème interne à CST Microwave Studio, problème pour lequel il n'y a pas de solution disponible à l'heure actuelle. La décision a été prise de ne pas poursuivre cette voie pour la création de motifs. En revanche, il nous semble nécessaire de préciser que ce type d'algorithme est néanmoins parfaitement adapté à la création de motifs bi-couches formés par l'impression des deux faces d'une feuille de papier. Avec l'évolution des moyens de calcul, ces techniques seront très certainement prometteuses dans les années à venir.

III.5 Recherche d'un motif approprié

III.5.a Motifs doubles

Une façon de créer un motif innovant, qui réponde à l'ensemble du cahier des charges, pourrait être d'assembler deux motifs disjoints, comme pour fabriquer les motifs « ETRI » [22]. Il faut cependant espérer que les dimensions des motifs de base permettent ensuite de régler leur(s) fréquence(s) de résonance respective(s) sur celles désirées. Ainsi, certains motifs, de par leur construction géométrique, ne peuvent être utilisés. C'est souvent le cas de nombreux motifs bi-bandes simplement créés en superposant deux motifs existants, comme un carré dans un rond ou un tripôle dans un cercle. Or, chaque motif résonne en fonction de ses dimensions. Accorder les tailles des motifs pour résonner aux fréquences choisies et faire en sorte que les motifs continuent à s'emboîter, est souvent impossible. Une équipe de chercheurs [122] a cependant permis de mettre à jour certaines inégalités entre les différentes fréquences de résonance mises en jeu dans le cas de ce genre d'assemblage. Ainsi, en imposant $f_{s1} < f_{s2}$, on sait que :

$$f_{d1} < f_{s1} < f_{s2} < f_{d2}, \quad (3.5)$$

où f_{sj} est la fréquence de résonance des motifs de la SSF j dans le cas où ils sont seuls et f_{dj} la fréquence de résonance des motifs de la SSF j dans le cas où ils sont en présence de motifs d'une autre forme.

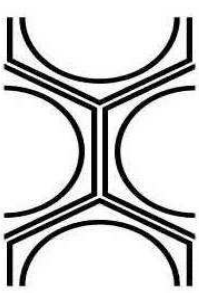
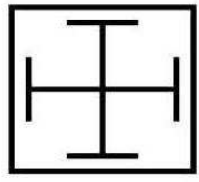
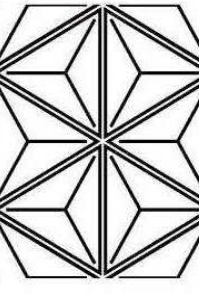
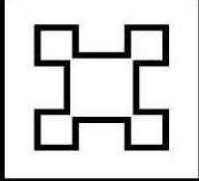
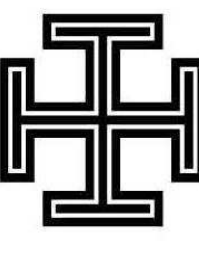
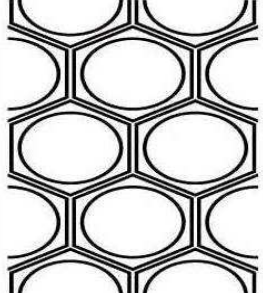
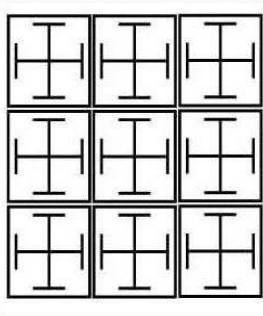
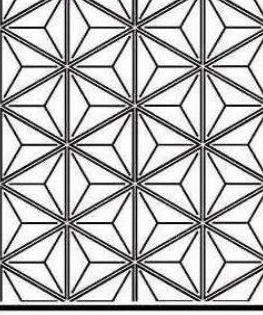
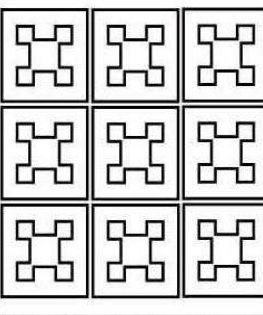
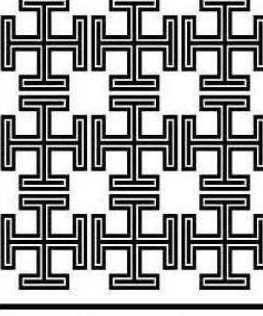
De plus, comme Munk le précise dans [21], pour que l'insensibilité à l'angle d'incidence soit importante, il faut que la densité de motif, et donc leur imbrication les uns dans les autres, soit la plus grande possible. Nous pouvons donc supposer que cette façon de créer des motifs risque de donner lieu à des motifs trop sensibles à l'angle d'incidence pour notre application. En effet, dans le cas d'un tripôle dans un cercle par exemple, le tripôle pourrait être bien plus densément groupé s'il n'y avait pas de cercle. Il en va de même avec un rond et un carré ou d'autres formes standards.

Nous avons tout de même vérifié ces affirmations grâce à des simulations. Les résultats, pour cinq configurations de motifs standards permettant de régler les résonances sur 0.9GHz et 1.8GHz environ, sont donnés dans le tableau ci-après et complétés par des courbes présentées en annexe B. Seul un résumé des résultats est donné dans le tableau 10 mais il est suffisant pour se faire une idée des performances générales d'un motif.

Comme nous pouvons le voir, les performances de ces motifs sont loin de satisfaire le cahier des charges que ce soit en termes d'insensibilité à l'angle d'incidence, de largeur de bande rejetée ou de taux de couverture en matière conductrice. De plus, comme nous l'avons supposé, tous ces motifs sont affectés par une sensibilité à l'angle d'incidence excepté le motif croix de Jérusalem imbriquée qui, lui, l'est par un taux de couverture trop important.

Une modification de l'agencement d'un motif connu en vue d'y intégrer, de façon dense, un autre motif (ou le même) pourrait permettre d'obtenir de meilleurs résultats. Le motif « Mitsubishi » [24] illustre ce principe en utilisant un tripôle légèrement modifié dont l'agencement est complètement revu. La seule autre illustration de ce principe que nous avons trouvé est la cellule présentée sur la figure 38 où des tripôles sont agencés sous forme d'hexagone dans lequel est inséré un hexagone réel. Malheureusement, en raison du dimensionnement physique des motifs choisis l'imbrication ne peut pas se faire de façon dense pour résonner à 0.9GHz et 1.8GHz et les performances s'en trouvent dégradées. Cette solution de construction est néanmoins intéressante au vue des résultats de simulation : figure 39 et tableau 11.

Tableau 10 : Résumé des performances de motifs bi-bande (0.9 et 1.8GHz) obtenues à partir de deux motifs basiques imbriqués l'un dans l'autre.

Nom du motif et taux de couverture	Hexagone et cercle (21.3%)	Carré et croix de Jerusalem (22.3%)	Triangle et tripôle (28%)	Double carré convolué (25.3%)	Croix de Jerusalem imbriquées (46%)
Cellule élémentaire simulée					
Différence TE/TM pour	Grande (5%)		Moyenne (1.3%)		
	Faible (0.43%)		Faible (0.65%)		
Sensibilité à l'angle d'incidence pour chaque	Mauvaise en TE et TM (16.9 et 16.4%)	Mauvaise en TE (109%) et en TM (8.9%)	Moyenne en TE (7.3 %) et moyenne en TM (4.3%)	Mauvaise en TE et TM (10.5%)	Parfaite en TE et TM (0.44%)
	Parfaite en TE (0.21%) moyenne en TM (4.4%)	Moyenne en TE (3.95%) parfaite en TM (0.22%)	Mauvaise en TE et TM (5.9 et 5.6%)	Bonne en TE (2.28%) et moyenne en TM (3.5%)	Bonne en TE et TM (2.36 et 1.93%)
Bande passante pour chaque Fres (théta=0°)	112MHz (13.5%)	37MHz (4%)	77MHz (8.5%)	90MHz (9.8%)	18.6MHz (2%)
	98MHz (5.3%)	163Mhz (9.2%)	142MHz (7.8%)	76MHz (4.2%)	121MHz (6.5%)
illustration de l'agencement					

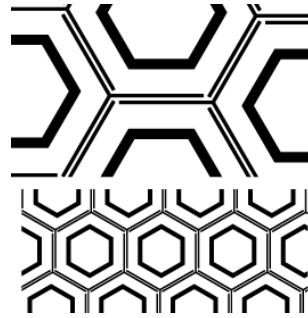


Figure 38 : Agencement innovant de tripôle et d'hexagone. En haut cellule élémentaire et en bas agencement de 4 cellules.

En effet, on observe dans le tableau 11 des performances sensiblement identiques à celles des autres motifs présentées dans le tableau 10 malgré cette mauvaise imbrication apparente.

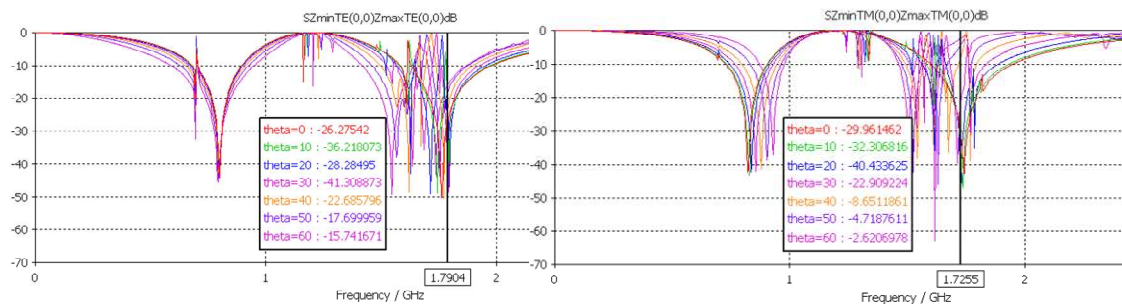


Figure 39 : Résultat de simulation pour le motif figure 38.

Tableau 11 : Résumé des performances du motif figure 38.

Nom du motif	Différence TE/TM pour chaque Fres (pour $\theta = 0$)	Sensibilité à l'angle d'incidence pour chaque Fres ($\theta = [0-60^\circ]$)	Bande passante pour chaque Fres (pris pour -20db)
Tripôle hexagone	Moyenne (2.62%)	Parfaite en TE (0.75%) mauvaise en TM (12.2%)	63MHz (7.6%)
	Moyenne (1.19%)	Mauvaise en TE et TM (13.3 et 13.6%)	108Mhz (6.2%)

Ainsi, pour conclure sur la création de motifs à l'aide de l'imbrication de différents motifs, malgré de nombreux essais, la possibilité d'utiliser deux motifs disjoints pour former un motif complexe répondant à notre cahier des charges n'a pas pu aboutir. Il convient donc d'explorer d'autres procédés de création de motifs.

III.5.b Motifs innovants

i Introduction

Une autre façon de créer un motif qui répond au cahier des charges est de concevoir un motif innovant, en s'appuyant sur des améliorations de motifs connus. En effet, [108] montre qu'en perturbant un motif existant sans en modifier son agencement, de bons résultats pouvaient être obtenus. Nous allons donc suivre cette voie. En effet, comme nous l'avons vu dans la partie précédente, il n'est pas trivial de rajouter une structure au milieu d'une autre. Nous allons donc tenter d'améliorer un motif existant afin de le rendre multi-bande tout en maintenant ses performances initiales.

ii Choix de l'élément de base

Il convient donc de faire le choix d'un motif de départ. Pour cela, grâce à des simulations comparatives, un classement des principaux motifs de base a été dressé en fonction de nos critères. Les résultats sont donnés dans le tableau 12. Notons que, dans notre cas, nous ne nous soucions pas du tout de la taille du motif mais seulement du taux de matière conductrice par cellule. L'application papier-peint disposant d'une surface plus que conséquente pour réaliser n'importe quel motif.

Tableau 12 : Classement pour notre application des principaux motifs de bases existant. 1 = meilleur motif, 5 = moins bon.

Type d'élément	Croix de Jerusalem	Anneau	Tripole	Carré	Hexagone
Taux de couverture	5	1	2	3	4
Différence TE TM	1	1	2	1	1
Insensibilité	2	5	1	3	4
Largeur de bande	4	5	3	1	2
Classement pour notre application	4	5	1	2	3

On voit donc que les deux meilleurs motifs pour notre application sont le tripôle et le carré. Concernant ce dernier, son amélioration a déjà été faite par de nombreux travaux à l'aide de fractales de type Koch [123], de courbes de Hilbert ou d'éléments convolués [124][125]. Malheureusement ce design très symétrique, dont l'agencement ne laisse que peu de place à l'imagination, ne se prête guère à d'autres types de modifications. De plus, comme il a déjà été dit, le design fractal est plus sensible à

l'angle d'incidence que celui du tripôle lorsque plusieurs bandes de fréquences apparaissent. Ainsi, nous préférons donc utiliser le tripôle.

iii Premières modifications de l'élément de base choisi et création du treepôle originel

Des travaux de chercheurs iraniens [126] ont utilisé les fractales de Sierpinsky pour modifier un tripôle et obtenir un résultat bi-bande. En revanche, encore une fois, l'utilisation de fractale limite l'insensibilité à l'angle d'incidence car elle empêche le maintien d'une imbrication forte. De même, [127] effectue des modifications sur un tripôle pour en réduire la taille, mais empêche là encore le maintien de l'imbrication forte. En revanche, bien qu'ayant le même défaut, [127] effectue des modifications différentes des fractales habituelles, comme le montre la figure 40. Ces modifications font penser à un type de fractale qui n'a jamais été utilisé à ce jour avec un tripôle : les arbres. Contrairement à leur utilisation avec d'autres éléments [103], ces fractales présentent un grand intérêt lorsqu'elles sont associées au tripôle car elles permettent de maintenir une imbrication forte.

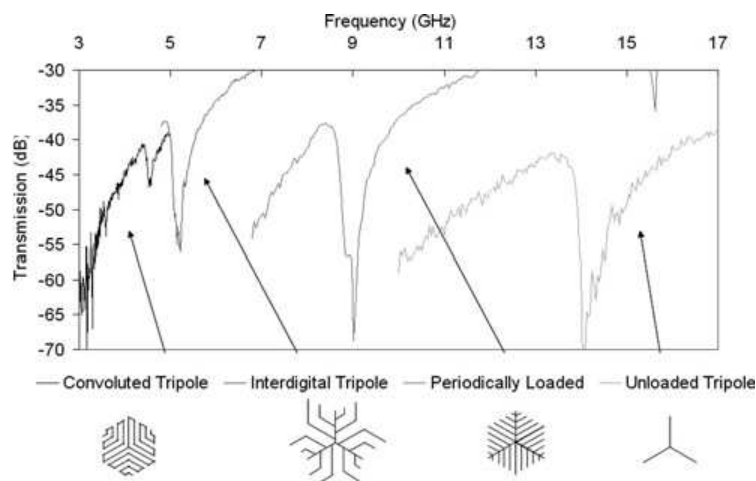


Figure 40 : Exemple tiré de [127] montrant la modification de tripôle classique.

Nous sommes donc partis de ce constat pour réaliser les motifs présentés sur la figure 41. Nous avons ajouté de nouvelles branches au milieu de chacune des branches initiales du tripôle afin que se forme un tripôle de dimension inférieure sur chacun des trois axes du tripôle. Comme pour les arbres, différents niveaux peuvent être générés et la figure centrale de la figure 41 illustre une génération de niveau deux. Sur cette même figure, à droite, on observe qu'en plus de maintenir l'agencement standard du tripôle, on

peut aussi appliquer les mêmes améliorations qu'au tripôle. En effet, classiquement, l'ajout d'éléments au bout du tripôle en font un élément appelé tripôle ancre dans la littérature [21]. Ils permettent d'augmenter les performances du tripôle. Dans le cas présent, cette amélioration peut être appliquée à chaque branche de chaque tripôle de chaque niveau.

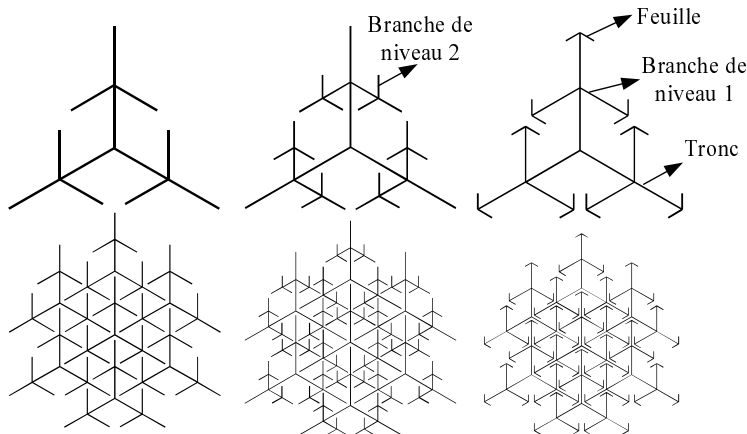


Figure 41 : Gauche : représentation d'un tripôle arbre à un niveau de branche et son agencement en dessous ; au milieu, tripôle arbre à deux niveaux de branche et son agencement en dessous ; à droite, tripôle arbre à un niveau de branche avec une feuille au niveau du tronc et au niveau de la branche de niveau un et son agencement en dessous.

Nous désignerons ce motif par tripôle arbre ou « *treepôle* », qui provient d'un jeu de mot entre arbre (*tree* en anglais) et tripôle. Ce nom sera utilisé tout au long de ce mémoire et, comme certaines modifications seront encore apportées au motif défini à la figure 41, on qualifiera le treepôle défini figure 41 de originel. Nous désignerons aussi les ancres comme des feuilles et le tripôle de base comme le tronc. Les segments des tripôles autres que le tronc seront, quant à eux, appelées branches.

iv Performances du treepôle originel

Il convient d'observer les performances de ce treepôle originel à l'aide de simulations. Pour cela, nous utiliserons un treepôle à un seul niveau de branche avec des feuilles sur le tronc et les branches. Les dimensions du motif testé sont présentées dans la figure 42 et le tableau 13. Les résultats de ce premier essai sont présentés sur la figure 43. On observe des performances très intéressantes. En effet, en premier lieu, trois bandes de fréquences existent. Ensuite, la fréquence à laquelle la première résonance se produit est très basse au regard des dimensions du motif (environ $\lambda/12$), ce qui

permet d'avoir une très forte imbrication. De plus, l'insensibilité à l'angle d'incidence est excellente pour la première résonance. Elle est aussi encourageante pour la deuxième résonance car il y a seulement 2.18% et 2.8% de variation de la fréquence centrale entre 0 et 60° en TE et en TM respectivement. Ce décalage est d'ailleurs produit par l'apparition d'une résonance parasite qui devrait pouvoir être éliminée en ajustant divers paramètres. Enfin, concernant la troisième résonance, malgré un très bon résultat en TE, on atteint les 4.6% de variation en TM.

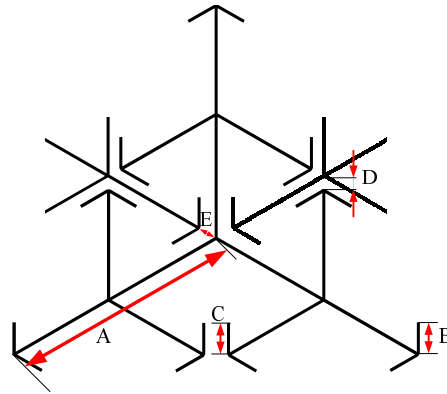


Figure 42 : Principales dimensions composant un trepôle original à un seul niveau de branche avec une feuille au tronc et aux branches de niveau un.

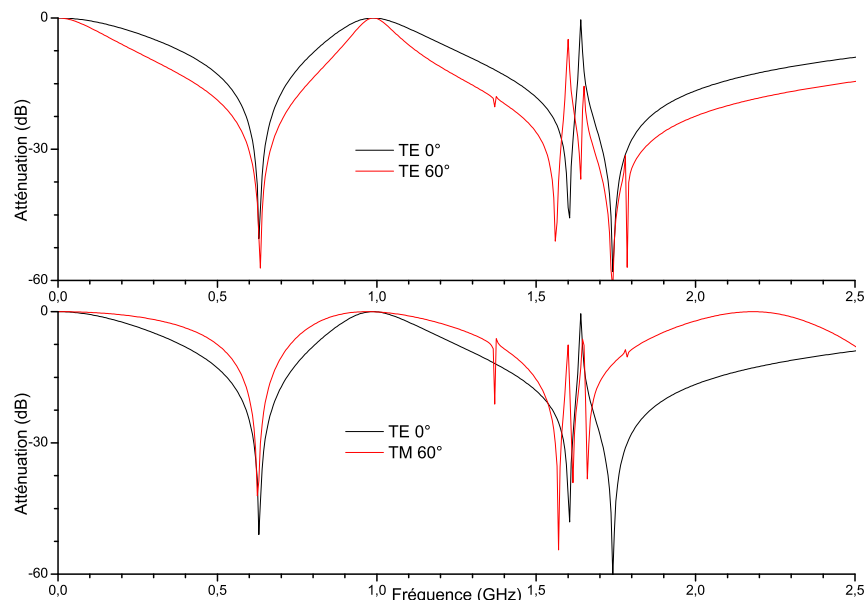


Figure 43: Premières simulations d'un trepôle original.

Tableau 13 : Dimensions utilisées pour les simulations de la figure 43.

Paramètre	A	B	C	D	E
Dimension (mm)	40	15	15	0.75	0.75

Un autre point positif concernant les performances de ce motif est le fait que l'écart entre les fréquences mises en jeu correspond assez bien à notre problématique : une première et une deuxième résonance assez éloignées et une deuxième et une troisième assez proches. En revanche, l'écart entre la première et la deuxième résonance est un peu trop grand (rapport 2.55 au lieu de 2) et celui entre la deuxième et la troisième résonance est, quand à lui, un peu trop faible (rapport 1.08 au lieu de 1.16).

v Identification et premiers réglages des fréquences de résonances

Adaptons maintenant ce motif aux fréquences désirées soit 0.9GHz, 1.8GHz et 2.1GHz. Pour cela, la théorie des circuits équivalents nous dit que n'importe quelle SSF peut être modélisée par des filtres LC mis en parallèle [128]. Un filtre pour chaque résonance est ainsi modélisé. Dans notre cas, nous utilisons cela pour le réglage grossier du design. En effet, si chaque fréquence de résonance est définie comme :

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}, \quad (3.6)$$

où L est l'inductance équivalente et C la capacité équivalente de la partie du motif résonnant à la fréquence f_r , alors, si l'on connaît les parties réactives du motif, on peut savoir s'il faut en augmenter ou en diminuer la taille ou l'écartement avec une autre partie. En effet, pour diminuer L , donc augmenter la fréquence de résonance, il suffit de diminuer la taille de la ligne parcourue par des courants générés par un champ électrique incident à la fréquence de résonance. De même pour C , où il suffit de diminuer la surface en regard entre deux lignes parcourues par des courants générés par un champ incident, ou d'augmenter leur écartement. Ainsi, pour mieux décrypter le fonctionnement de ce motif et ainsi savoir comment le régler aux fréquences d'intérêts, une visualisation des courants de surfaces générés par les champs incidents est intéressante.

On observe sur la figure 44a et b que la première résonance est due à la première moitié du tronc qui forme un tripôle standard. On retrouve d'ailleurs la distribution de courant classique pour un motif tripôle, ce qui explique les bonnes performances concernant l'insensibilité angulaire de la première résonance. Ainsi, pour augmenter la fréquence de la première résonance de 0.6 à 0.9GHz, selon la

théorie expliquée ci-dessus, plusieurs options s'offrent à nous. La première est de diminuer la taille de la partie réactive, en diminuant A (voir le tableau 13), pour en réduire l'inductance équivalente. La deuxième est de diminuer la capacité que forme cette partie réactive, la première moitié du tronc, avec la feuille du tronc du motif adjacent, comme on le voit figure 42. Pour cela, on peut augmenter E ou diminuer B.

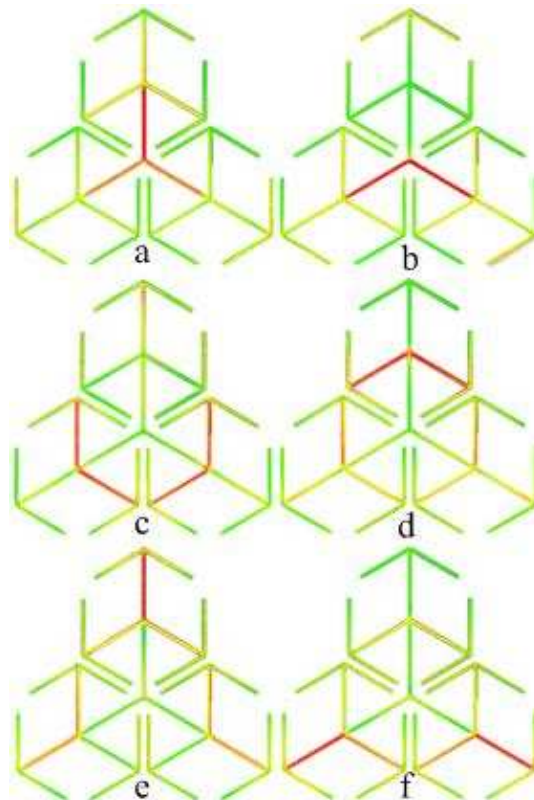


Figure 44 : Courants de surface pour la première résonance en TE (a) et TM (b), la deuxième en TE (c) et TM (d) et la troisième en TE (e) et TM (f). Plus la couleur est rouge plus les courants sont importants, plus elle est verte moins ils le sont (obtenus à partir de CST Microwave).

Concernant la deuxième résonance, que montrent les figures 44c et d, elle est due, que ce soit en TE ou TM, aux branches du treepôle. L'imbrication entre motifs adjacents reste donc bonne, d'où les performances d'insensibilité obtenues. La fréquence de résonance obtenue est, cette fois encore, trop basse et doit être augmentée de 1.6GHz environ à 1.8GHz. Pour cela, il y a là encore plusieurs possibilités. La première est de diminuer la taille des branches de niveau 1, en augmentant D ou en diminuant A, en vue de baisser l'inductance équivalente. La deuxième est de diminuer la capacité formée entre les feuilles et les branches de niveau 1 ou le tronc du treepôle voisin, en diminuant C ou en augmentant D. En effet, une moitié de feuille forme une capacité avec le tronc et l'autre moitié avec une branche. En revanche, cette fois-ci,

l'augmentation de fréquence nécessaire est beaucoup plus faible que pour la première résonance.

Enfin, concernant la troisième résonance (voir la figure 44e et f), elle est due à la deuxième moitié du tronc, ainsi qu'aux branches dans une plus faible mesure. Cette deuxième partie de tronc est moins bien imbriquée et est moins présente lors d'une répétition de motifs que les branches. C'est la raison pour laquelle on retrouve une insensibilité angulaire moins bonne que pour les deux autres résonances. Cette fois encore, la fréquence de résonance est trop faible et doit être augmentée de 1.7GHz environ à 2.1GHz. Comme toujours, plusieurs possibilités : une diminution de A pour l'inductance équivalente de la deuxième moitié du tronc et, toutes celles déjà citées pour la première ou la deuxième résonance.

On voit que beaucoup de paramètres produisent des effets sur plusieurs résonances en même temps. Cela complique le réglage d'autant que les augmentations de fréquence requises ne sont pas les mêmes pour chaque résonance (33, 20 et 22% d'augmentation). Ces modifications sont d'ailleurs suffisamment importantes pour ne pas pouvoir être atteintes simplement avec une modification de la capacité qui restera à chaque fois assez faible étant donné les surfaces en regard. De plus, les possibilités d'augmentation de longueur des branches pour diminuer la fréquence en augmentant l'inductance sont également limitées. Une amélioration du motif doit donc être proposée, au risque de se retrouver avec une deuxième et une troisième résonance beaucoup trop haute en fréquence. En effet, en l'état actuel du motif, la première étape devrait être un réglage de la première fréquence de résonance. Il ne peut donc qu'être effectué à l'aide d'une homothétie globale augmentant toutes les fréquences de résonances d'environ 33%, malgré que la deuxième et la troisième résonance ne nécessitent que 20 et 22% d'augmentation, d'où des problèmes de réglages.

vi Création du trepôle final

La première amélioration possible est la différenciation entre la première et la deuxième moitié du tronc, décentrant ainsi la base des branches par rapport au tronc. Cela permet de régler indépendamment la première et la troisième résonance. En revanche, étant donné les modifications de fréquences voulues : grosse augmentation de la première résonance et une faible des deux autres, on risque de se retrouver dans le

cas de la figure 45a. En effet, en diminuant la première moitié du tronc, on oblige le rétrécissement des branches ce qui conduit ainsi à une deuxième et à une troisième résonance trop haute en fréquence. Dans ce cas, l'abaissement de ces résonances ne peut d'ailleurs pas se faire à l'aide d'une modification de la capacité, car la taille des feuilles ne peut plus être augmentée. De plus, seule une moitié de feuille est maintenant utile comparé au cas de la figure 42. Cette situation n'est pas idéale dans notre cas.

Une seconde modification, permettant d'augmenter l'inductance équivalente d'une branche, peut alors être mise en place à l'aide de ce qui est couramment appelé une convolution [129]. Cette dernière, illustrée à la figure 45b, permet de garder l'agencement désiré tout en augmentant la taille des branches. En effet, comme on le voit sur la figure 45c, la convolution peut s'appliquer plusieurs fois. Elle peut aussi prendre plusieurs formes mais, dans le cas présent, seule la plus simple est utilisée car elle est suffisante. Elle est non symétrique par rapport à l'axe de la branche car, comme on le voit figure 45a, un seul coté de la branche peut être exploité en raison des modifications des dimensions requises. En revanche, cette amélioration ne permet pas d'augmenter la capacité équivalente formée par les feuilles des branches. Au contraire, elle l'a réduit.

Une troisième et dernière modification a donc été appliquée sur les feuilles des branches afin d'en augmenter la taille (voir la figure 45d). Il s'agit d'orienter les deux moitiés de feuilles de façon indépendante l'une de l'autre, au contraire de [24], afin d'épouser la direction du tronc du treepôle voisin.

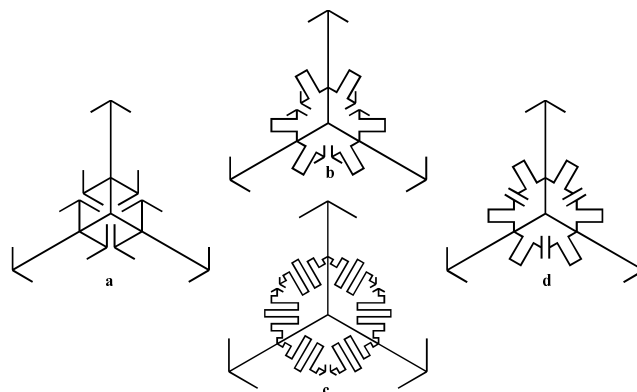


Figure 45 : Améliorations successives du treepôle.

Le motif final retenu qui peut accepter de nombreuses variations est celui dont la cellule élémentaire est présentée à la figure 46.

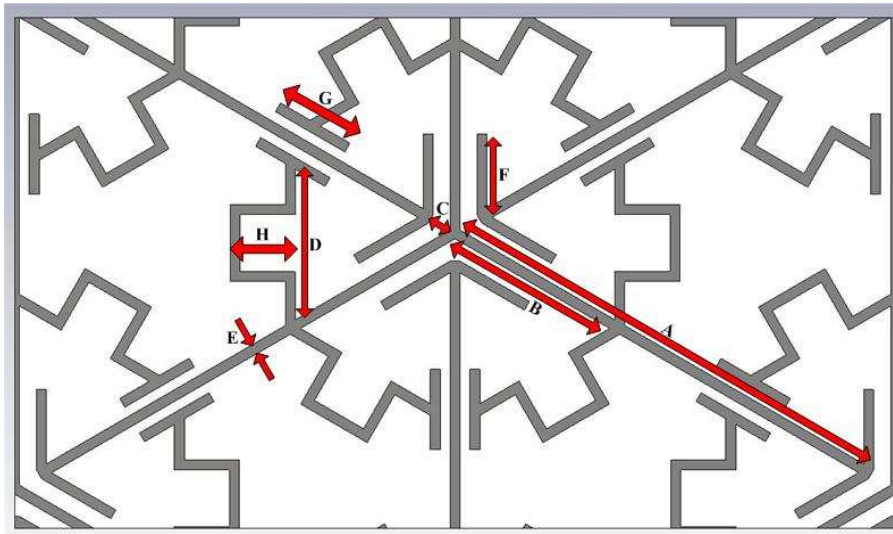


Figure 46 : Cellule élémentaire du motif final principalement utilisé et les paramètres qui la composent.

vii Performances du treepôle final

Avec la structure présentée à la figure 46, deux ou trois bandes correctement réglées et ayant de bonnes performances peuvent être obtenues. En effet, avec les réglages autorisés par ces paramètres, la troisième bande peut disparaître au profit de la deuxième. On peut s'en apercevoir en regardant la figure 47 et la figure 48, qui montrent l'allure de l'efficacité de filtrage en fonction des angles d'incidence jusqu'à 80° . Les paramètres ayant permis d'obtenir ces courbes sont présentés tableau 14. On peut noter que les performances sont, à vue d'œil, de bonne qualité mais un examen approfondi est nécessaire. On note aussi la présence de plusieurs artefacts de simulations se traduisant par des pics de résonances pour des angles d'incidence élevés.

On observe une très bonne insensibilité et ce jusqu'à 80° : 3.85% et 2.7% pour les deux fréquences ciblées. Ces dernières sont d'ailleurs réglées de telle sorte qu'une fois le substrat ajouté, les fréquences retombent aux valeurs d'intérêt soit 2.45 et 5.5GHz. L'annexe B montre les courbes d'efficacité de filtrage en fonction de l'angle d'incidence pour un substrat d'épaisseur 1.6mm de permittivité 4.3 et de perte 0.025.

Ce motif, que ce soit dans une version 2 ou 3 bandes, présente un taux d'occupation en matière assez faible. En effet, il oscille entre 18 et 20% selon les fréquences mises en jeu et le nombre de bandes, ce qui est meilleur que le motif « croix et carré » présenté à la section III.3.b.

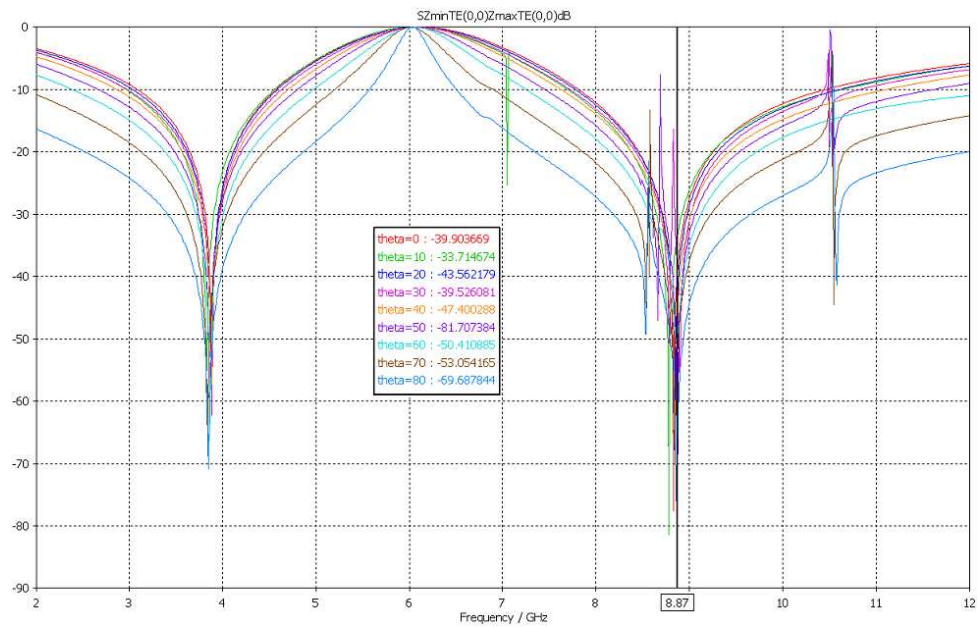


Figure 47 : Simulations TE d'un treepôle pour le WiFi.

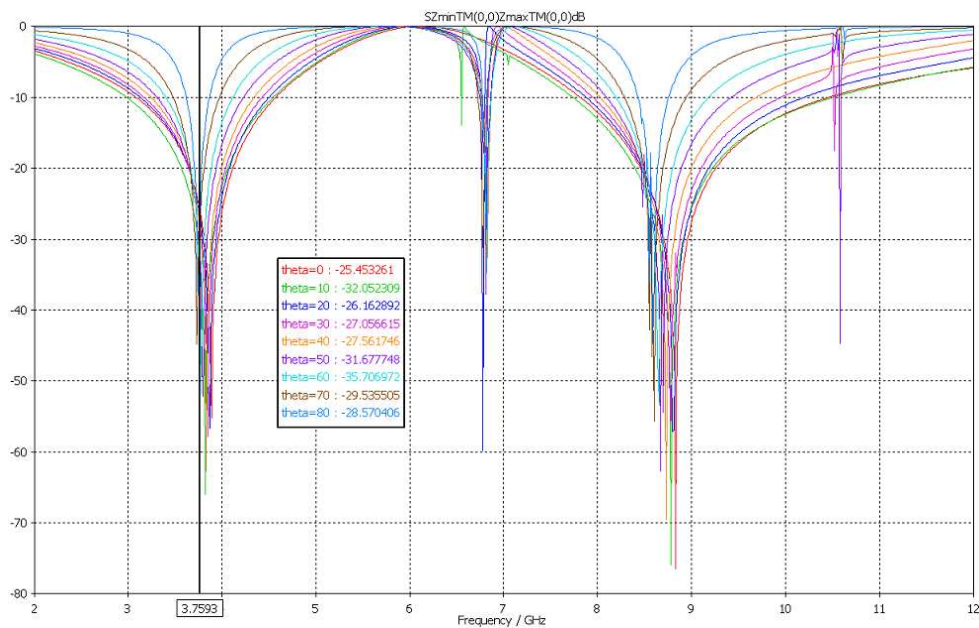


Figure 48 : Simulations TM d'un treepôle pour le WiFi.

Tableau 14 : Réglage des paramètres pour un fonctionnement en WiFi.

Paramètre	A	B	C	D	E	F	G	H
Dimension (mm)	10	3.61	0.558	3	0.25	2	1.6	1.75

Lorsque deux bandes sont présentes, il est intéressant d'étudier l'évolution des fréquences de résonance en fonction des paramètres afin de visualiser les possibilités de réglage du motif et de vérifier si, globalement, les grandes tendances citées à la section III.5.bv restent vraies. En effet, pour un motif tri-bande, l'évolution de la

dernière bande dépend, comme nous l’avons expliqué, de la majorité des paramètres et il est donc difficile de vérifier les effets énoncés précédemment. Pour cela, nous partons d’un motif dont le paramétrage provoque la même figure d’atténuation en fonction de la fréquence que celle de la figure 47 et de la figure 48. Les paramètres sont donnés dans le tableau 15. Nous faisons ensuite varier ces paramètres de quelques millimètres pour chacun d’eux. Cette fois-ci, il est à noter que les simulations ont été effectuées avec un substrat d’épaisseur 1.6mm, de permittivité 4.3 et de perte 0.025. Ceci ne change rien pour l’évolution de la fréquence de résonance en fonction des paramètres.

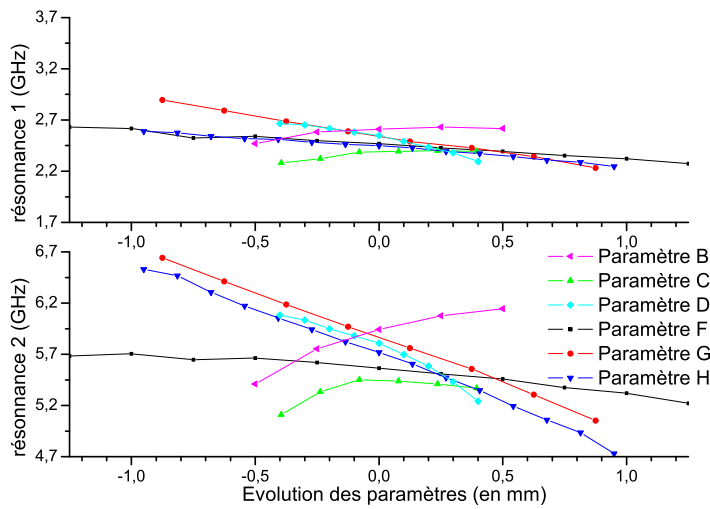


Figure 49 : Evolution des fréquences de résonance en fonction des paramètres B, C, D, F, G et H.

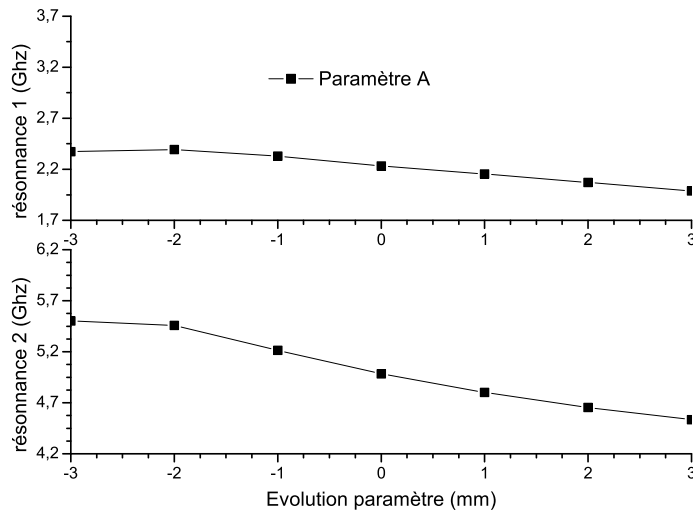


Figure 50 : Evolution des fréquences de résonance en fonction du paramètre A.

Tableau 15 : Réglage des paramètres pour la figure 49 et la figure 50.

Paramètre	A	B	C	D	E	F	G	H
Dimension (mm)	12	3.56	0.617	2.64	0.25	1.5	1.125	1.45

On retrouve donc bien dans la figure 49 et la figure 50 les tendances énoncées précédemment :

- augmenter C ou diminuer F augmente la première fréquence de résonance ;
- diminuer D ou G augmente la deuxième fréquence de résonance ;
- diminuer A augmente la troisième fréquence de résonance qui est ici superposée à la deuxième.

En revanche, pour le paramètre B, le résultat obtenu diffère de celui attendu. En effet, sachant que la première résonance est due à B, on s'attendait à ce que sa fréquence augmente lorsque B diminue. Or, c'est l'inverse qui se produit. Cet anomalie est due au fait que, lorsque B augmente, D n'augmente pas. Ainsi les feuilles des branches ne forment plus de capacités avec la deuxième moitié du tronc. Cela produit donc un gros impact sur la deuxième résonance car elle inclut la troisième censée être provoquée par cette partie du tronc.

Dans le même ordre d'idée, l'effet provoqué sur la première résonance reste opposé à celui attendu. Il s'agit là d'une limitation de l'aide fournie par la théorie des circuits équivalents. En effet, lorsque l'imbrication est trop forte, comme c'est le cas ici étant données les dimensions mises en jeu, la moindre modification provoque une modification de capacité sur l'ensemble des éléments constituant le motif et il devient donc impossible de séparer les effets de l'évolution de chaque paramètre. L'aide fournie par la figure 49 et la figure 50 est donc d'autant plus intéressante pour régler les fréquences de filtrage.

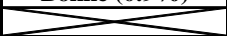

viii Conclusion et résumé des performances

Pour conclure, nous comparons le treepôle final avec les motifs les plus performants rencontrés dans la littérature présentés à la figure 31 et dans le tableau 8. Les courbes de fonctionnement détaillées d'un treepôle bi-bande et tri-bande sont exposées à la figure 51 et à la figure 52. Enfin, un résumé des performances est présenté dans le tableau 16.

On voit que le motif treepôle est plus performant que ses concurrents (cf figure 32 et figure 33). En effet, cette fois-ci l'ensemble des spécifications du cahier des charges en termes d'insensibilité à l'angle d'incidence et de valeur d'atténuation est respecté. En revanche, malgré de très bonnes performances en termes de largeur de

bande rejetée, notre motif ne remplit pas encore totalement le cahier des charges. On est supérieur à 15% pour la première résonance des motifs bi-bande et tri-bande, on a 7 à 8% et 5.5 à 6.2% pour la deuxième résonance du motif bi-bande et tri-bande respectivement et enfin, entre 1.56 et 1.94% pour la troisième bande du motif tri-bande.

Tableau 16 : Résumé des performances du treepôle final optimisé en bi-bande et tri-bande.

Nom du motif	Treepôle bi-bande	Treepôle tri-bande
Différence TE/TM pour chaque Fres (pour $\theta = 0$)	Bonne (0.43%)	Moyenne (3.5%)
	Bonne (0.9%)	Bonne (0.66%)
		Bonne (0.78%)
Sensibilité à l'angle d'incidence pour chaque Fres (fréquence de résonance) : $\theta = [0-60^\circ]$	Parfaite en TE (0.43%) et bonne en TM (1.75%)	Parfaite en TE et TM (0 et 0.46%)
	Parfaite en TE (0%) et bonne en TM (1.59%)	Parfaite en TE (0%) et bonne en TM (1.7%)
		Bonne en TE et TM (2.5 et 1.16%)

Le treepôle fait aujourd'hui l'objet d'un brevet [130] et d'autres chercheurs ont rapidement compris l'intérêt de ce type de structure comme le montre [131] qui a été publié quelques mois seulement après le dépôt du brevet.

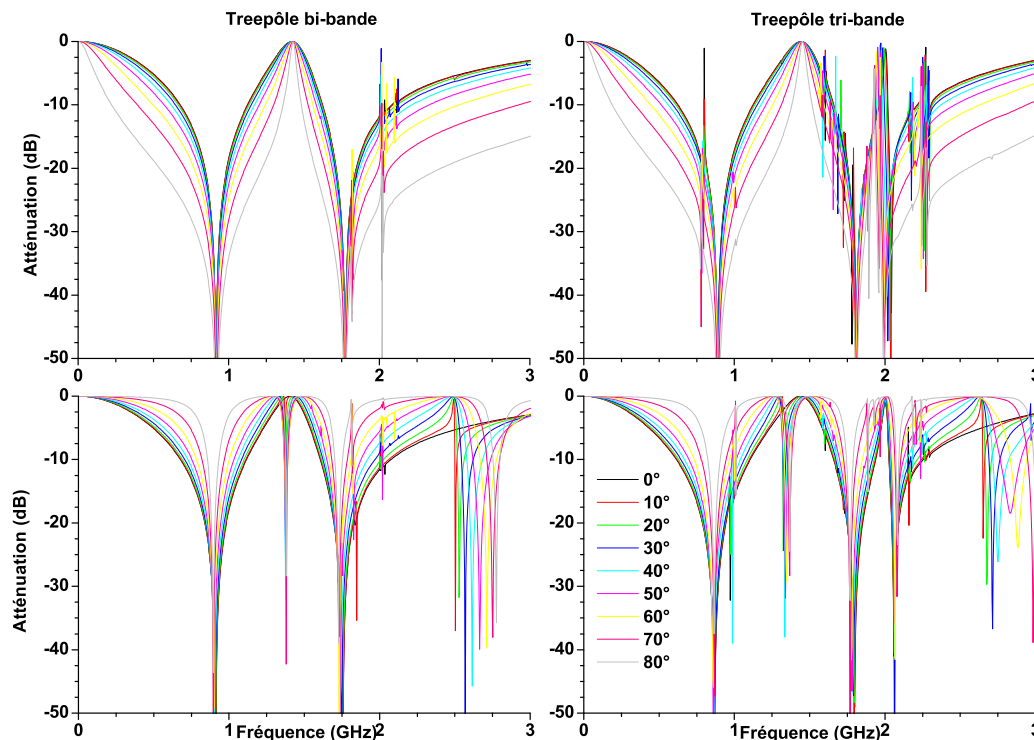


Figure 51 : Simulations de deux motifs treepôle optimisés en bi et tri-bande (gauche et droite respectivement). Polarisation TE en haut, TM en bas. Pour chaque graphe, l'angle d'incidence varie entre 0 et 80° .

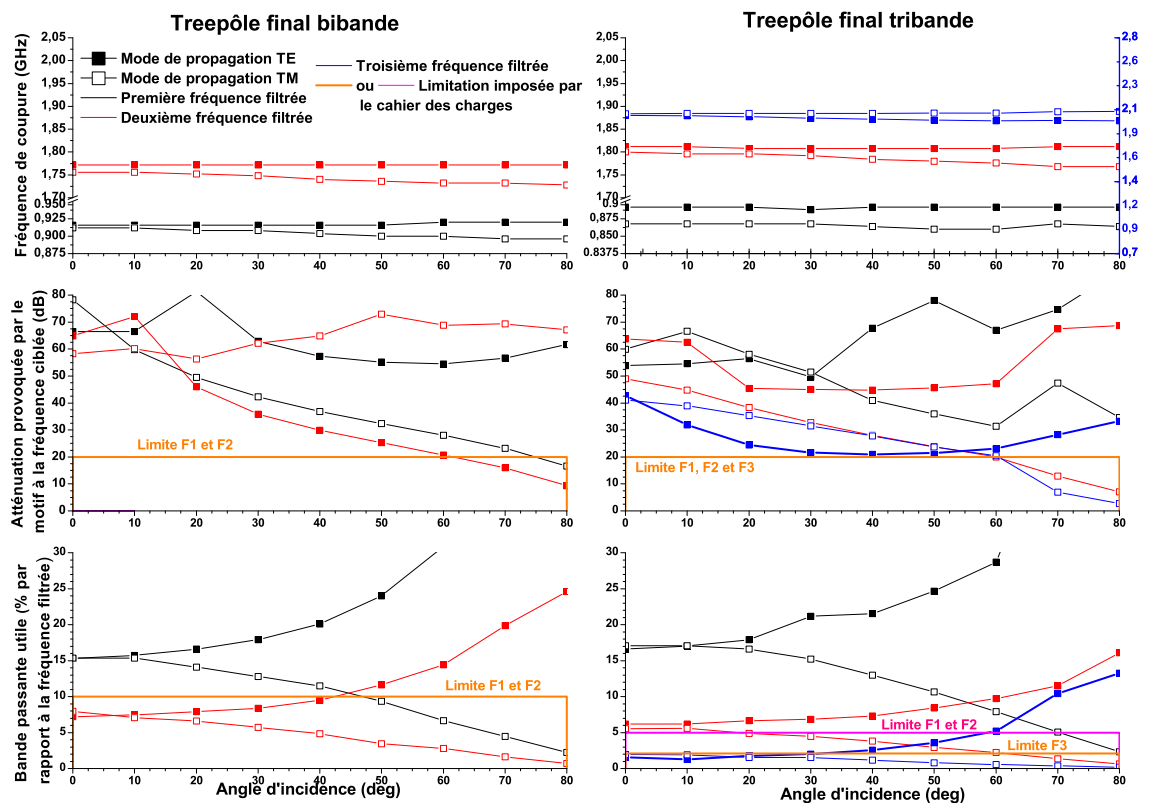


Figure 52 : Analyses des résultats obtenus avec des treepôles finaux pour les polarisations TE et TM, pour toutes les fréquences de coupure. Les limites imposées par le cahier des charges sont aussi illustrées : fréquence filtrée, atténuation et largeur de bande rejetée en fonction de l'angle d'incidence.

III.6 Conclusion et choix du motif à utiliser

Comme nous l'avons vu, de nombreuses possibilités s'offrent à nous. Bien que certains motifs existants se rapprochent de notre cahier des charges, celui développé permet d'en être encore plus proche. Ainsi, le motif treepôle, adapté aux fréquences GSM bi-bande ou tri-bande, ou aux fréquences WiFi, sera utilisé en priorité.

Il a été décidé de fabriquer, dans un premier temps sur époxy standard, le motif ETRI (pour comparaison), le motif treepôle WiFi, treepôle GSM bi-bande et tri-bande. Une fois ces échantillons testés et une fois l'assurance que les simulations soient conformes avec les mesures, une fabrication d'échantillons sur papier sera lancée avec le motif treepôle WiFi uniquement. En effet, comme nous le verrons dans la section IV et V, des limitations sur la mesure et sur le format de fabrication font que ce motif est à préférer. Pour cela, les dimensions caractéristiques du motif seront modifiées afin de se conformer au substrat et à son support.

IV Méthodes de mesure et premiers résultats

IV.1 Introduction

Notre but est désormais de mesurer l'efficacité de filtrage des SSF. Or, nous savons qu'une taille minimum est nécessaire au bon fonctionnement de ce type de surface [132]. Généralement, les dimensions des échantillons utilisés sont de l'ordre de 1.5 à 7λ environ [126][107] pour des fréquences proches de celles qui nous intéressent. Seule la référence [132] fait état de la possibilité de mesurer des échantillons de taille légèrement inférieure à la longueur d'onde. Nous devons donc installer un banc de mesure capable, tout en prenant en compte cette contrainte et la taille de nos échantillons, de mesurer les performances des motifs GSM et WiFi afin de confirmer les bons résultats obtenus en simulation.

Nous verrons donc quelques types de mesures qui pourraient s'avérer intéressants pour notre problématique puis, nous décrirons le banc de test développé ainsi que ses limitations et la façon de l'utiliser.

Nous verrons ensuite les premières mesures effectuées sur des substrats d'épaisseur 1.6mm à base d'époxy de type FR4 avec une permittivité affichée à 4.7 et des pertes à 0.025 . Nous y ferons graver dessus les motifs treepôle GSM bi-bande, treepôle GSM tri-bande, treepôle WiFi et, afin de s'assurer que nos mesures sont en accord avec des travaux existants, le motif ETRI. Afin d'en mesurer l'efficacité sans problème de dimensionnement, nous utiliserons une taille d'échantillon de $50\text{cm}\times 50\text{cm}$. Cela représente, pour la plus basse de nos fréquences testées, la plus petite des dimensions couramment utilisées dans la littérature pour ce type de mesure, soit 1.5λ .

IV.2 Méthodes de mesure

IV.2.a Double chambre réverbérante

Une première technique de mesure adaptée à nos besoins est basée sur l'utilisation d'une double chambre réverbérante [133][134]. Ce moyen de mesure est disponible à Grenoble au Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB) qui l'utilise pour des mesures d'atténuation des matériaux du bâtiment.

Il s'agit de deux cages de Faraday accolées, parfaitement isolées de l'extérieur qui permettent, grâce à l'émission et à la réception de champs diffus, de caractériser les propriétés électromagnétiques d'un matériau. Une antenne et un brasseur de mode sont mises en route jusqu'à l'obtention d'un champ diffus dans les deux pièces, qui communiquent via une ouverture, puis le niveau de réception dans la pièce attenante est mesuré. Une fois la calibration terminée, un échantillon est positionné et, la mesure est effectuée.

L'utilisation de champ diffus entraîne une répartition équivalente de l'ensemble des angles d'incidence et de la polarisation dans les deux pièces. Ce type de mesures est donc celui s'approchant le plus des conditions réelles d'utilisation du métapapier.

Malheureusement, le fonctionnement de ce dispositif ayant été prévu jusqu'en fréquence assez basse (400MHz), l'utilisation de brasseurs de modes mécaniques entraîne une grande lenteur dans l'obtention de champs diffus uniformes. De plus, de nombreux procédés de caractérisation intermédiaires sont nécessaires et allongent le temps d'une mesure. Cette dernière ne pouvant se faire que par tranche de 20KHz, le temps nécessaire à l'obtention d'une courbe de largeur 2GHz environ a été estimé à plus de 200 heures par échantillon !

De plus, l'utilisation de cet équipement étant facturée à l'heure, il n'est donc pas possible pour nous de l'utiliser.

IV.2.b Méthode issue des normes

Les normes MIL-STD-285 [135] ou IEEE-STD-299 [136] traitent des précautions à prendre pour caractériser l'atténuation d'un échantillon. Elles définissent globalement les équipements de tests à utiliser, leur positionnement et leur dimensionnement. La première datant de 1956 a été remplacé par la seconde plus récente en 1995 mais sans réels changements.

Elles ne permettent cependant pas de comparer deux mesures réalisées sur la base de ces normes étant donné le manque de spécifications précises [137] [138]. En effet, différents setup existent et la référence [138] décrit un dispositif similaire au nôtre (voir la section IV.3) en insistant sur les précautions à prendre au niveau de l'interface échantillon/métal. Quant à elle : la référence [137] décrit un dispositif plus complexe et

plus coûteux à mettre en place. Il s'agit d'une ouverture pratiquée dans une cage de Faraday permettant le positionnement d'un échantillon sous test. La mesure est ensuite réalisée à l'aide de deux antennes placées respectivement dans et en dehors de la chambre. Notons que cette solution se rapproche de celle imaginée par le CSTB.

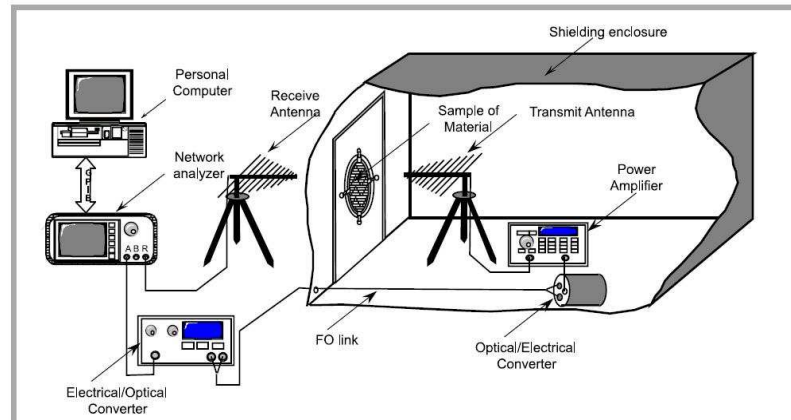


Figure 53 : Adaptation de la norme MIL-STD-285 proposée par l'ITA PWr [137].

Il n'est cependant pas possible d'envisager une telle solution qui nécessite une adaptation de la chambre anéchoïque de l'IMEP qui ne sera pas démontable.

IV.3 Banc de mesure utilisé

IV.3.a Principe général du banc de mesure

Il existe donc plusieurs solutions pour ce type de mesure, même si la littérature sur les SSF n'en fait pas état. En effet, sur l'ensemble des références déjà citées, toutes utilisent le même procédé. Nous avons donc tout naturellement et assez rapidement orienté notre choix sur ce moyen de mesure.

Le procédé classiquement rencontré consiste à émettre une onde électromagnétique et d'en analyser la transmission à travers la SSF sous test. L'envoi et la réception se fait grâce à des antennes et l'analyse de la transmission grâce à un analyseur de réseaux vectoriel connecté à chacune des antennes. Ainsi, cet appareil balayera un spectre de fréquence défini, et nous récupérerons une courbe présentant l'atténuation provoquée par l'échantillon en fonction de la fréquence. En effet, toute atténuation supplémentaire, due à la distance entre antenne par exemple, est prise en compte dans la calibration de l'analyseur. Cette dernière est effectuée à vide, sans

échantillon, et permet de prendre en compte l'ensemble des pertes électromagnétiques dues à l'environnement de mesure.

L'environnement où se fait la mesure est important. En effet, lorsqu'une OEM n'est pas transmise à cause d'une SSF, elle est réfléchiée. Or, l'onde réfléchiée peut, suite à différents schémas de réflexion, de dispersion ou de diffraction, atteindre l'antenne de réception et être ainsi comptabilisée comme une onde transmise (trajet bleu figure 54). Il en va d'ailleurs de même pour les ondes émises par l'antenne et qui ne rencontrent pas l'échantillon (trajet rouge figure 54).

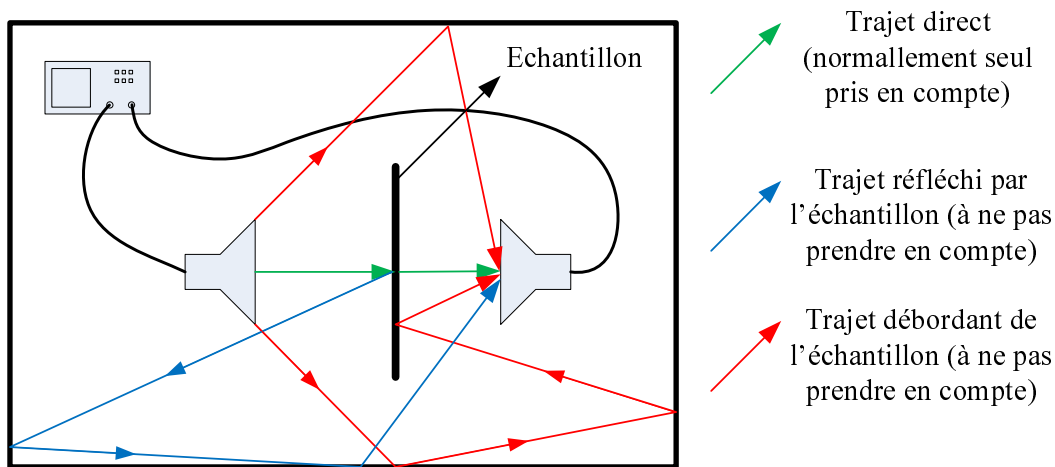


Figure 54 : Exemple d'OEM comptabilisées comme transmises alors qu'elles ne devraient pas.

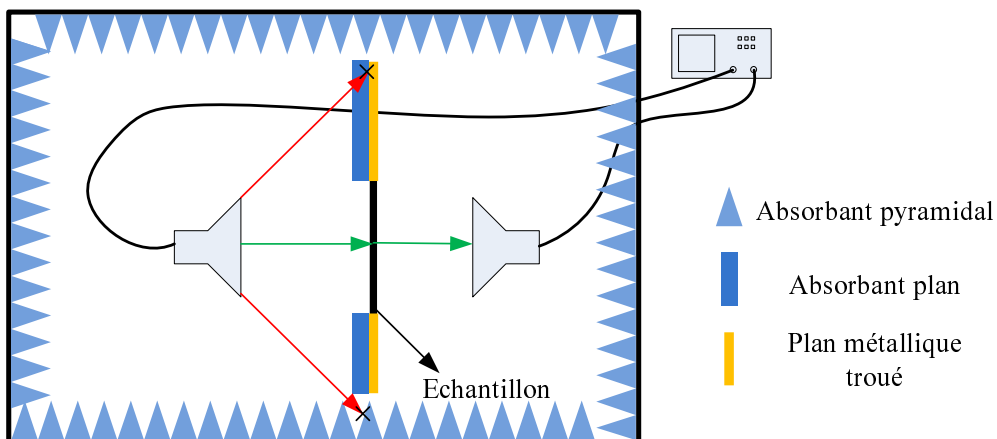


Figure 55 : Schéma du dispositif de test utilisé.

Pour empêcher les fuites d'énergie autour de l'échantillon, on utilise un grand panneau métallique couvert d'absorbant, ou non, et dont le centre est troué pour accueillir l'échantillon. Ceci empêche la majorité des ondes non directes de passer mais cette solution doit être complétée par l'utilisation d'une chambre anéchoïque qui

élimine en théorie toute réflexion parasite (voir la figure 55). Malgré cela des trajets diffractés peuvent continuer à exister sur les bords du panneau métallique.

Les défauts des absorbants et la diffraction toujours possible impliquent donc d'utiliser des antennes les plus directives qui soient tout en gardant une largeur de bande d'émission/réception suffisante pour les mesures. Notre choix d'antenne, comme celui de la majorité des travaux sur les SSF déjà présentés [100]-[102],[107],[110], s'est donc porté sur les cornets. Malgré ce choix, les lobes secondaires des antennes restent toujours présents et des trajets diffractés pourront toujours avoir lieu.

Une des nécessités du cahier des charges impose de faire des mesures d'efficacité de filtrage en fonction de l'angle d'incidence de l'onde. Pour cela, deux solutions peuvent être mises en place. La première consiste à modifier l'orientation des antennes et de les faire se déplacer le long d'un arc de cercle pour conserver la même distance. Cette solution est techniquement complexe et couteuse. Nous préférons utiliser la deuxième solution qui consiste à appliquer un angle de rotation au panneau métallique et donc à l'échantillon comme le montre la figure 56.

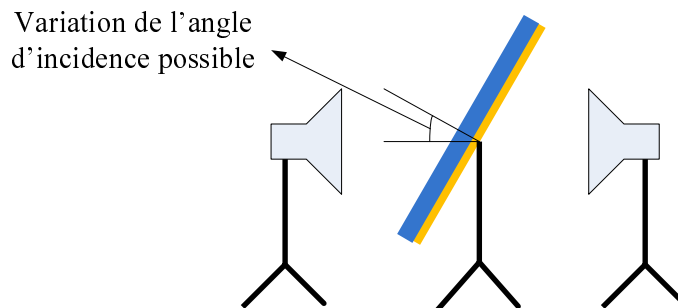


Figure 56 : Rotation du panneau métallique pour mesurer l'effet de l'angle d'incidence sur l'échantillon.

En revanche, nous ne pourrions mesurer les très grands angles d'incidence. En effet, lorsqu'un angle trop grand est appliqué, l'absorbant va se trouver sur le passage des ondes et empêcher la mesure. En pratique, cette limitation a été constaté pour des angles supérieurs à 60° ce qui est donc suffisant pour s'assurer de la concordance avec les simulations qui, si elles sont validées, nous donneront le comportement pour les angles plus élevés.

La mesure doit aussi se faire en fonction de la polarisation de l'onde. Pour cela, il suffit de modifier l'orientation des antennes pour passer d'une polarisation TE à TM correspondant respectivement à une orientation de l'antenne verticale ou horizontale.

IV.3.b Matériel utilisé

Contrairement à plusieurs autres travaux qui utilisent un banc en bois recouvert de feuilles d'aluminium, nous avons opté pour une structure entièrement en métal. D'un point de vue mécanique cela facilite grandement la rotation du panneau, lui assure une bonne rigidité, nous permet de le couvrir d'absorbant et de positionner l'échantillon de façon simple et répétable. D'un point de vue électromagnétique, chaque interface entre deux couches de papier d'aluminium représente des fuites éventuelles qui sont difficiles à stopper. Un banc fait d'une seule tôle d'aluminium ne présente pas ce défaut.

Le schéma du banc est illustré à la figure 58. La face avant du panneau est constituée d'une tôle d'aluminium comportant une ouverture au centre (figure 59). Cette tôle accueille l'absorbant électromagnétique et est toujours positionnée du côté émission. Sur la face arrière, afin de renforcer la structure et d'offrir un positionnement simple et répétable des échantillons, des poutrelles métalliques sont utilisées pour former un cadre autour de l'ouverture (figure 60). Une ouverture dont les dimensions sont légèrement inférieures aux dimensions des échantillons permet de les positionner en butée contre la tôle d'aluminium. Cela limite au maximum les fuites sur les bords de l'échantillon.

La taille de l'ouverture est de 50x50cm². Il a été décidé de faire réaliser deux adaptateurs permettant de réduire l'ouverture à une taille A3 (420mmx297mm) ou A4 (210mmx297mm) qui sont des standards adaptés au papier. L'adaptateur se positionne grâce à des chevilles fixées dans les poutrelles métalliques garantissant ainsi une bonne répétabilité et une continuité électrique (figure 61). Des adaptateurs de mousse absorbante ont aussi été fabriqués afin de compléter correctement le dispositif.

Enfin, un axe de rotation placé au milieu du panneau, et donc de l'échantillon sous test, permet de faire tourner le panneau pour faire varier l'angle d'incidence. Afin de garantir une répétabilité des mesures, les positions des angles sont repérées et peuvent être maintenues à l'aide d'une goupille autobloquante. La mousse absorbante présente sur le panneau est une mousse ECCOSORB® AM, référence AN-79, garantissant un niveau de réflectivité inférieur à -20dB pour toute fréquence supérieure à 600MHz (figure 63).

Le reste du matériel utilisé est :

- deux antennes cornets de chez A.H. system, référence SAS-571 [139]. Fréquence de travail 0.7-18GHz, dimensions 14.2cm x 24.4cm x 27.9cm (LxHxP) et angle d'ouverture suivant la courbe de la figure 57 ;

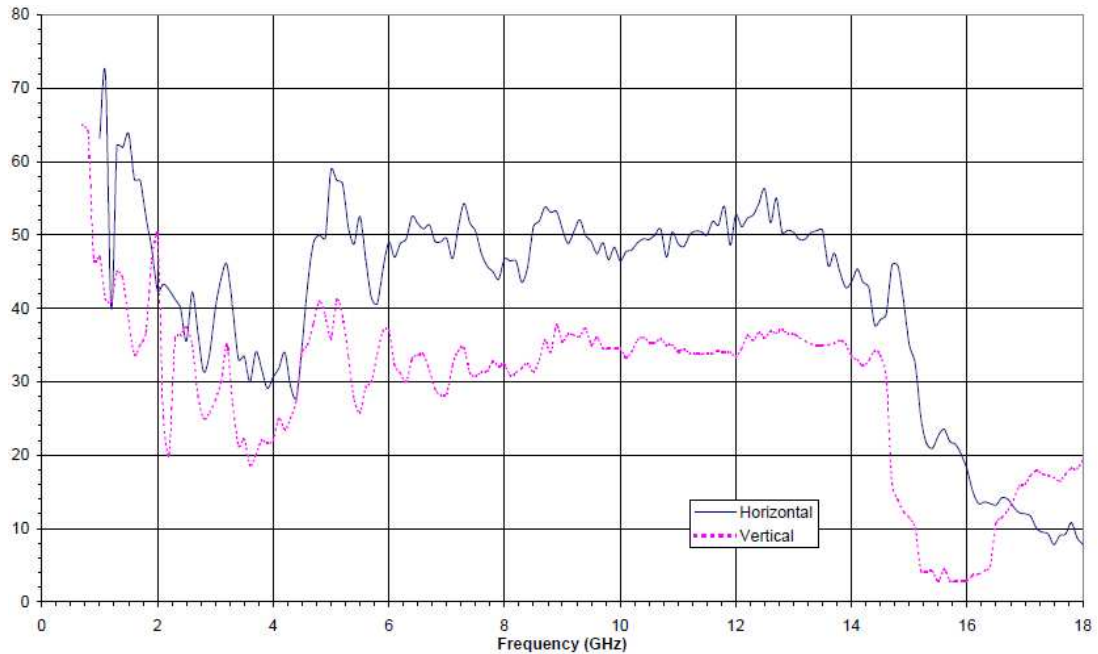


Figure 57 : Angle d'ouverture à mi puissance en fonction de la fréquence [139].

- un analyseur de réseau Agilent 8720ES dont les fréquences de mesure s'étalent de 50MHz jusqu'à 20GHz ;
- deux câbles de chez ATEM de 4m chacun (ref : COA2777), DC-18GHz, avec élastomère protecteur ;
- une chambre anéchoïque de 5.1mx5.4mx4.6m (LxPxH). L'absorbant disposé à l'intérieur permet normalement de faire des mesures à partir de 500MHz.

Concernant le dernier point, il est important de préciser que la chambre anéchoïque n'a été mise à disposition pour nos mesures qu'à la fin de nos travaux (deuxième trimestre 2011). Nous avons donc produit la quasi-totalité de nos résultats sans la chambre (figure 62), comme cela a été le cas pour quelques travaux déjà présentés [110][126], ou non [140][141], puis, nous avons confirmé nos résultats dans la chambre (figure 64). Pour que ces comparaisons soient fiables, des mesures comparatives seront présentées dans la partie suivante concernant les limitations.

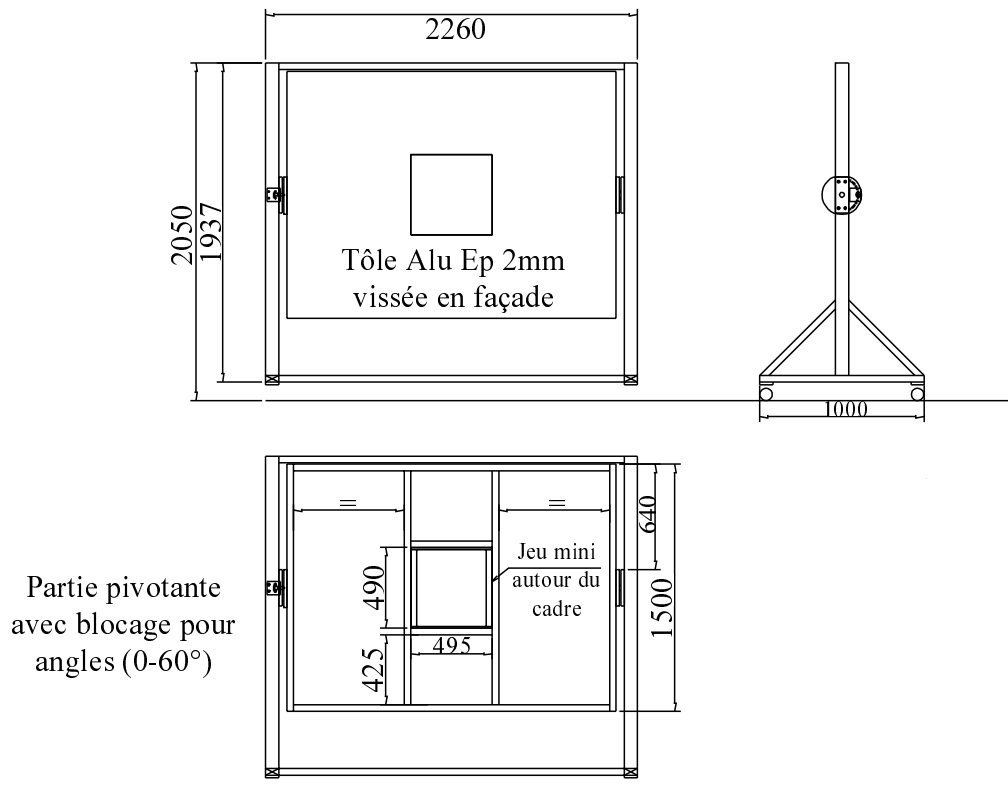


Figure 58 : Schéma du banc de mesure utilisé fabriqué par la société Elcom.



Figure 59 : A gauche : photographie d'un des deux pieds d'antenne fabriqué par Elcom. Un système de pivot permet de passer très simplement d'une polarisation horizontale à verticale (équivalente à TE/TM). Au milieu : photographie du banc (coté réception). 4 poutrelles de maintien assurent la robustesse du dispositif et les deux en position horizontale peuvent se déplacer suivant l'axe vertical pour assurer le maintien des échantillons. A droite : photographie du système de goupille auto bloquante pour le repérage des angles.

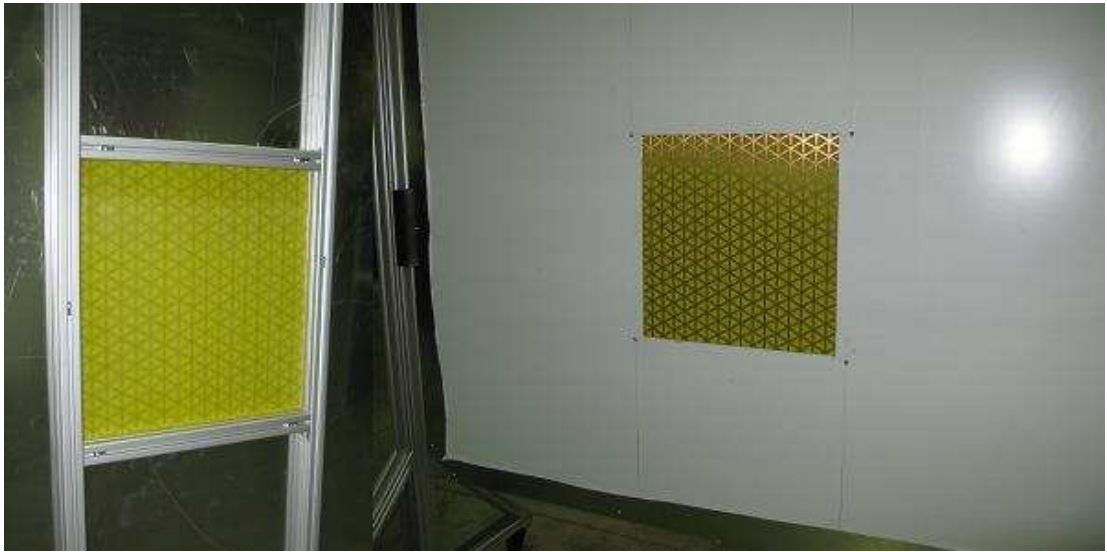


Figure 60 : A gauche : photographie du banc coté réception une fois un échantillon positionné. A droite : photographie du banc coté émission une fois un échantillon positionné en buté contre la tôle d'aluminium.



Figure 61 : A gauche : photographie du banc coté émission avec un échantillon mis en place ainsi qu'un adaptateur A3. L'échantillon est en butée contre l'adaptateur et plus contre la tôle métallique. A droite : Photographie du banc côté réception avec un échantillon mis en place ainsi qu'un adaptateur A3.



Figure 62 : A gauche : photographie du couloir dans lequel les manipulations ont eu lieu avant de se placer dans la chambre anéchoïque. A droite : photographie du banc avant la mise en place de l'absorbant.

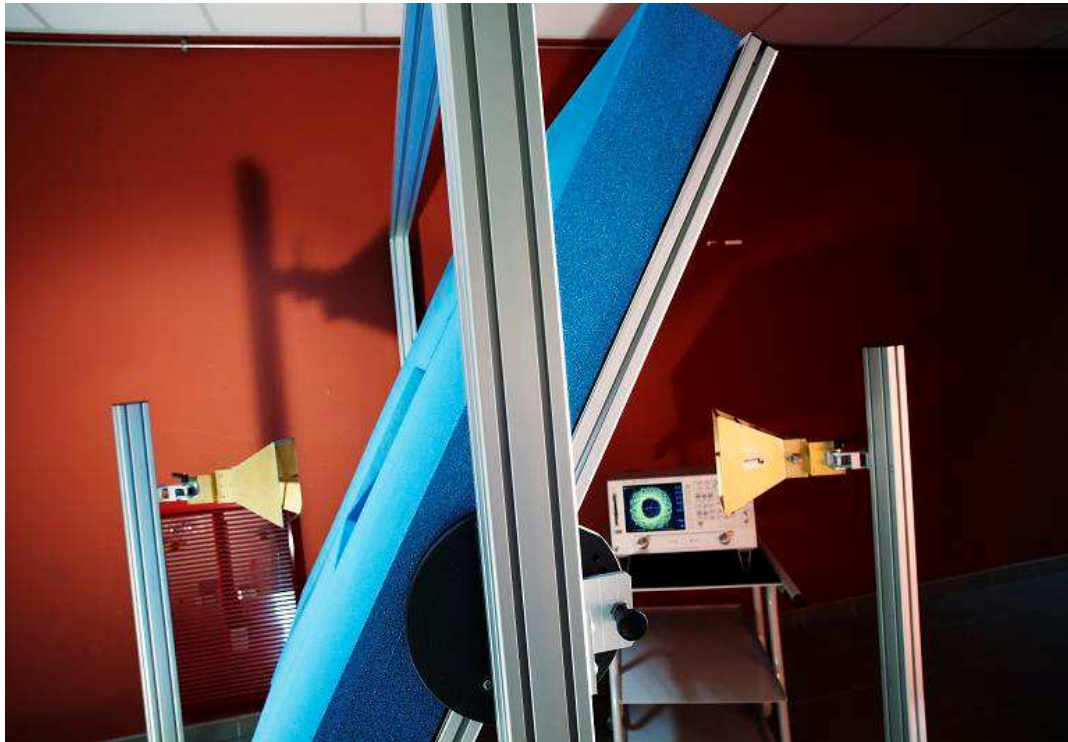


Figure 63 : Photographie de l'ensemble des éléments du banc de mesure (excepté les câbles) une fois l'absorbant mis en place. Le panneau du banc est incliné à 20° .

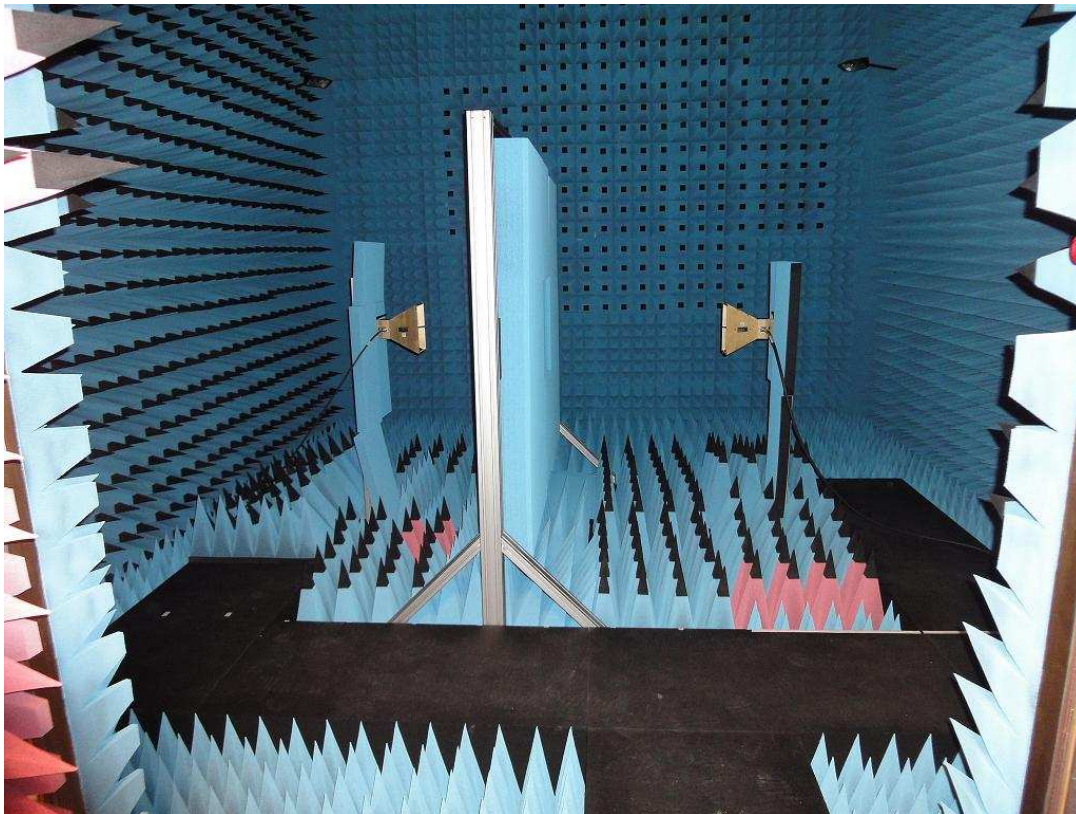


Figure 64 : Photographie du dispositif de mesure une fois placé dans la chambre anéchoïque.

IV.3.c Distances antennes-échantillon

La distance d'une antenne au panneau métallique est importante. En effet, si elle est trop faible, l'ensemble de l'échantillon ne sera pas éclairé par une OEM, réduisant ainsi la taille de l'échantillon utile à une portion trop faible au regard de la longueur d'onde. De plus, si cette distance est trop faible, les OEM émises par l'antenne ne seront pas planes et la mesure effectuée ne correspondra plus au comportement réel des SSF. Au contraire, si cette distance est trop grande les trajets de fuites dus à des phénomènes de réflexion ou de diffraction vont augmenter en raison de la trop grande surface illuminée par les antennes.

On sait, grâce à la figure 57, que l'angle d'ouverture maximum des antennes est d'environ 70° ce qui conduit donc à une distance minimum d'environ 36cm. De plus, la distance classiquement utilisée pour se situer en champ lointain est de $10D$ (où D est la plus grande dimension de l'antenne), soit 2.4m dans le cas présent. Pour les fréquences supérieures, l'équation :

$$R = \frac{2D^2}{\lambda} \quad (4.1)$$

est utilisée. On retrouve pour 6GHz une valeur proche de 2.4m. Ces définitions sont usuelles et les dimensions obtenues peuvent être diminuées. En effet, si cette distance est utilisée, la surface éclairée sera plus grande que la surface du panneau métallique ce qui posera problème. De plus, nous ne disposons pas d'assez de recul dans la chambre anéchoïque. Ainsi, un compromis a été trouvé à 1m soit une distance supérieure à $4D$. Coté réception, le problème d'onde plane ne se pose pas et, afin de limiter au maximum la réception des ondes parasites, nous utiliserons la limite basse fixé par l'angle d'ouverture de l'antenne : 40cm.

IV.3.d Méthodologie de mesure

La méthodologie de mesure employée est la suivante :

- mise en place du panneau central toujours au même endroit (grâce à des repères fixés au sol) ainsi que de l'analyseur de réseaux vectoriel ;
- mise en place des antennes d'émission et de réception, respectivement à 1m et 40cm du panneau central, ainsi que des câbles ;

- calibration de l'appareil en réflexion en insérant, une par une, 3 charges au bout de chaque câble (court-circuit, circuit ouvert et 50Ω) afin de prendre en compte les pertes dans les câbles ;
- calibration de l'appareil en transmission avec les antennes et en laissant l'ouverture (au format 50cmx50cm, A3 ou A4) vide permettant ainsi d'obtenir une courbe nulle pour la transmission après calibration ;
- mise en place des échantillons.

Cette procédure est à chaque fois la même. Dans le cas d'une mesure avec un angle d'incidence, elle doit être répétée depuis les étapes de calibration pour chaque angle. Lorsque la polarisation doit être changée, il suffit de changer l'orientation des antennes.

IV.3.e Limitations du banc de mesure utilisé

i Dynamique de mesure exploitable

Concernant la mesure, on peut se demander quelle dynamique de mesure nous avons avec le banc en chambre anéchoïque et en dehors.

Une façon de répondre à cette question est de mesurer l'atténuation provoquée par une tôle d'aluminium de 1.5mm d'épaisseur (voir la figure 65). En effet, elle devrait être largement supérieure à 60 ou 80dB [142]. En revanche, avec les trajets mal pris en compte (fuites qui se produisent à l'interface échantillon/métal, trajets diffractés, etc.) l'atténuation mesurée est inférieure.

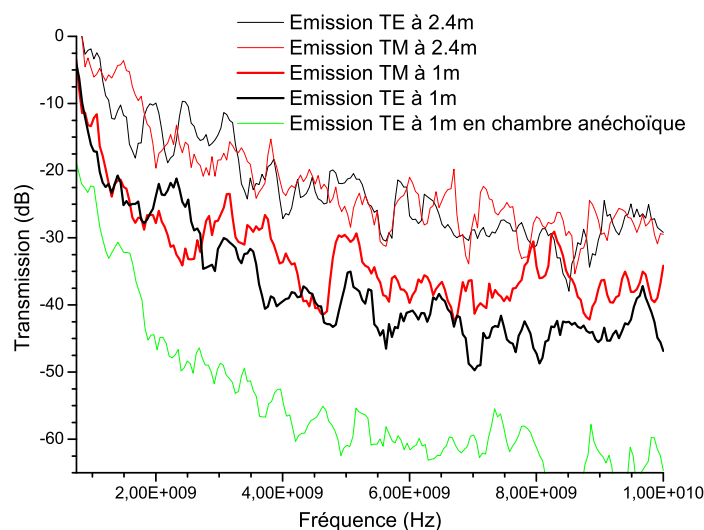


Figure 65 : Mesures de la transmission à travers une tôle d'aluminium d'1.5mm d'épaisseur.

Cette limitation de la dynamique de mesure est inévitable mais le but est qu'elle ne soit pas inférieure aux valeurs d'atténuation que nous désirons relevées. Ces valeurs limites ont été estimées entre 30 et 35dB environ à 0.9GHz à l'aide de simulations.

On observe sur la figure 65, que la dynamique du banc de mesure est variable en fonction de la fréquence. Dans la chambre, elle est d'environ 25dB à 900MHz et elle atteint les 50dB aux alentours des 2.4GHz pour finir à 60dB dès 4GHz.

Cependant, nos mesures ont eu lieu pour beaucoup d'entre elles en dehors de la chambre dans les conditions présentées à la figure 62. Dans ce cas, la réduction de la dynamique de mesure est amplifiée à cause des trajets multiples.

Comme le montrent les mesures affichées à la figure 65, la dynamique du banc de mesure en dehors de la chambre n'est, en basse fréquence, que de 15dB à 900MHz. En revanche, dès 2GHz, elle atteint des valeurs avoisinant les 30dB pour finalement atteindre les 35dB dès 4GHz.

Concernant les variations de dynamique, la tendance globale est bien expliquée par l'augmentation de l'angle d'ouverture de l'antenne pour les basses fréquences (voir la figure 57). Il en est de même pour quelques variations brutales, comme autour de 5GHz, ainsi que pour la différence de comportement TE/TM sur la bande 5-10GHz. En effet, pour un positionnement à 1m de distance, la dynamique en TE est meilleure qu'en TM car l'angle d'ouverture en TE est inférieur à celui en TM.

Lorsque la distance entre l'antenne et le banc augmente, nous n'observons plus ces différences TE/TM et nous observons globalement une baisse de la dynamique de mesure exploitable. La raison est que le nombre de trajets multiples augmente et qu'ils empêchent de retrouver les comportements dus à l'augmentation de l'angle d'ouverture de l'antenne pour les basses fréquences.

De plus, la présence des lobes secondaires de l'antenne peut entraîner des trajets de fuites supplémentaires dont il est difficile de s'affranchir, et ce quelque soit la fréquence et la distance entre l'antenne et l'échantillon.

On voit donc que cette limitation en dynamique n'impacte pas, ou très peu, les mesures sur des échantillons de type WiFi. En revanche, pour des échantillons de type GSM, on risque d'avoir une réduction de l'atténuation à 900MHz de 5dB dans la

chambre et plus forte hors de celle-ci : jusqu'à 15dB. Les autres fréquences GSM (1.8 et 2.1GHz) ne devraient pas, ou très peu, être impactées.

Mentionnons que dans la littérature beaucoup de travaux montrent des différences d'atténuation entre mesures et simulations plus ou moins grandes [22][107][110][125][126]. Les explications données imputent souvent la faute à la simulation ou à la réalisation. Il apparait clairement ici, que la qualité du banc de mesure et la réduction des trajets multiples sont des paramètres essentiels qui pourraient expliquer bon nombre des différences observées. Tout du moins, c'est le cas de la présente étude.

ii Bruit

De la même façon que pour la dynamique de mesure, on peut se poser la question sur le bruit de mesure. En effet, après la calibration il existe des fluctuations sur la mesure de 0.5dB dans le couloir et de 0.1dB dans la chambre. Elles sont dues aux appareils électriques utilisés et à la stabilité de l'environnement. Il s'agit là de ce qui est couramment appelé bruit de mesure et que l'on peut attribuer aux bruits électriques courants comme le bruit cosmique ou thermique. Ces fluctuations aléatoires ne sont pas gênantes pour nos mesures et nous n'en ferons aucun cas.

Au contraire, lorsque l'échantillon est positionné, on perturbe l'environnement de mesure par rapport à la calibration, car des trajets supplémentaires non pris en compte dans la calibration apparaissent. Il apparait alors des petites résonances fonction de l'environnement, similaires au phénomène d'échos parasites observés par les radars. Donc, en plus d'observer le comportement de l'échantillon, des trajets supplémentaires issus des réflexions sur l'échantillon vont générer des aléas sur la mesure qui, normalement ne sont à pas prendre en compte. Ces aléas peuvent aller jusqu'à quelques dB. On parle de bruit d'échos, ou dans le reste du manuscrit de bruit, malgré que ce soit une réaction provoquée par l'échantillon car, lorsque l'environnement de mesure change, ces modifications seront différentes. Elles doivent donc être filtrées si possible. Il est tout de même important de préciser que les mesures, si tant est que l'environnement ne soit pas modifié, sont parfaitement répétables.

Pour observer plus précisément ce bruit, une mesure avec une tôle d'aluminium n'est pas la plus adaptée car les variations de comportement dues à cette dernière sont

déjà très instables. Pour cela, nous avons utilisé une mesure d'un échantillon de papier présentée figure 66. Peu nous importe ici les performances de l'échantillon utilisé, seul le bruit et l'impact du filtrage nous intéresse.

Concernant le filtrage, nous nous contenterons d'utiliser la fonction lissage de l'analyseur de réseaux vectoriel utilisé. Le seul paramètre à régler pour cette fonction est la plage de moyennage que nous garderons à 125MHz pour l'ensemble de ces travaux.

Comme on le constate sur la figure 66, le bruit d'échos est assez important et nous préférons appliquer le filtrage précédemment décrit. En effet, la différence d'atténuation maximum entre une courbe filtrée ou non est de 2dB quelque soit la fréquence lorsque nous sommes dans le couloir.

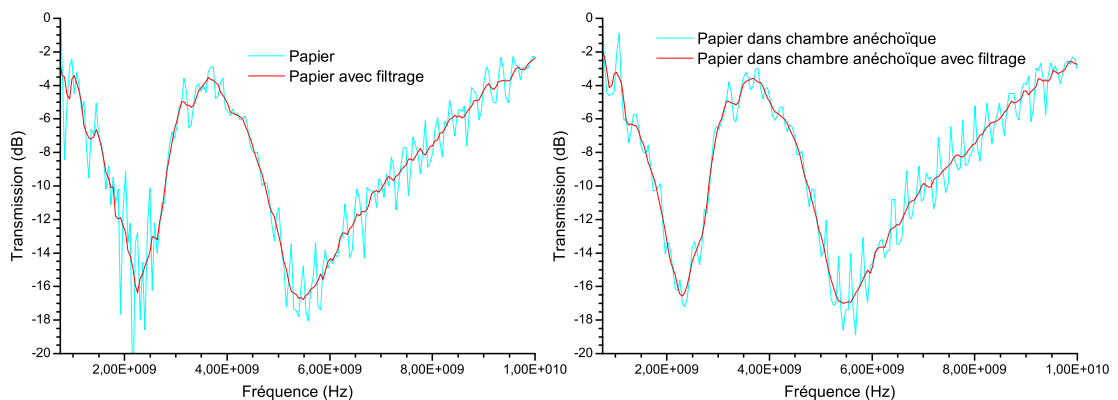


Figure 66 : Bruit de mesure et effet du filtrage dans le couloir et en chambre anéchoïque sur un échantillon papier.

On aurait pu penser qu'une fois dans la chambre anéchoïque, où l'environnement est fait de telle sorte qu'il n'influence pas la mesure, ce bruit serait réduit. Malheureusement, ce n'est pas vrai quelle que soit la fréquence. En effet, jusqu'à 3GHz le bruit est réduit mais, une fois ces fréquences dépassées le niveau de bruit est le même que dans le couloir. Le filtrage, qui reste donc nécessaire, réduit l'atténuation d'une valeur inférieure à 1dB pour les fréquences inférieure à 3GHz et de 2dB environ pour les fréquences supérieures.

Ce bruit toujours présent en chambre anéchoïque peut s'expliquer de différentes façons. La première pourrait être que la chambre présente un défaut car nous l'avons utilisée avant même qu'elle soit qualifiée et ne connaissons donc pas ses performances. Une autre explication pourrait être que, dans les basses fréquences étudiées, les

résonances multiples que l'on a appelé bruit d'échos, dues aux nouveaux trajets perturbateurs apparus suite au positionnement de l'échantillon, résonnent à cause de la présence de grands objets extérieurs au banc. Ainsi, l'effet est réduit grâce à la chambre. Tandis qu'en haute fréquence, les résonances de ces trajets perturbateurs ont lieu sur le banc lui-même, notamment à l'interface métal/échantillon ou sur les armatures, composées de plus petites structures. Donc, le bruit qu'engendrent ces résonances ne peut pas être réduit par la présence de la chambre.

Concernant les échantillons à base d'époxy, la conductivité est élevée et permet l'établissement de pics d'atténuation assez étroits et importants. Ces différences avec les échantillons papier ne favorisent pas le filtrage qui risque d'enlever trop d'informations. Nous préférons donc ne pas filtrer les mesures de ce type.

Au final, et pour simplifier les choses, sauf précisions particulières les mesures sur époxy ne seront jamais filtrées tandis que les mesures sur papier le seront systématiquement.

IV.4 Résultats de mesures sur les substrats époxy

IV.4.a Mesures sur substrat au format 50x50cm²

On peut voir sur la figure 67 les quatre échantillons qui ont été fabriqués sur époxy : le motif ETRI, le motif treepôle bi-bande GSM, tri-bande GSM et bi-bande WiFi. La couleur verte traduit la présence de vernis protecteur empêchant l'oxydation du cuivre. Le motif ETRI n'en a pas bénéficié mais malgré cela ses performances n'ont pas évolué durant plus d'un an et demi. Le motif tri-bande GSM a été fabriqué par un autre fournisseur et le substrat est donc légèrement différent.



Figure 67 : Photographie des quatre échantillons fabriqués sur Epoxy.

i Mesure du motif ETRI

Les premières mesures réalisées vont permettre de finir de valider le banc de test ainsi que les simulations effectuées. Pour cela, nous avons décidé d'utiliser dans un premier temps un motif connu dont les performances sont publiées. Nous utilisons pour cela le motif issu de [22], rebaptisé ETRI, dont les dimensions sont $a=w=1\text{mm}$, $l1=24.5\text{mm}$, $l2=30.5\text{mm}$, $b=3.8\text{mm}$, $g=0.5\text{mm}$, $t=35\mu\text{m}$, $h1=1.6\text{mm}$. Ces dimensions sont définies de la même façon que dans [22], voir la figure 68.

Ce motif à l'avantage de ne pas posséder de résonances parasites dans la bande d'étude. De plus, le décalage fréquentiel dû à l'augmentation de l'angle d'incidence est suffisamment important et stable pour bien le visualiser et ainsi obtenir de meilleures comparaisons avec les simulations. Celles-ci ont été effectuées avec une permittivité du substrat de 4.7 qui est une valeur volontairement plus élevée que la valeur réelle du FR4 : 4.3 à 4.4. En effet, la dynamique de mesure s'améliorant au fur et à mesure que la fréquence augmente, nous préférons obtenir, dans un premier temps, des résonances à des fréquences légèrement plus hautes que légèrement plus basses.

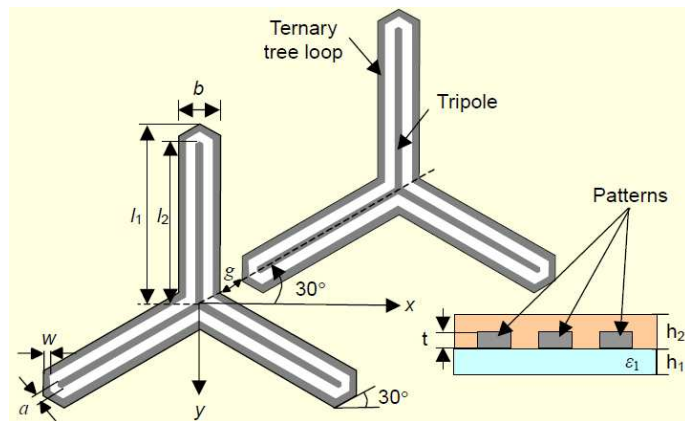


Figure 68 : Géométrie et paramètres de la cellule élémentaire du motif ETRI réalisé. Figure tirée de [22].

Les résultats ont été obtenus en suivant la procédure décrite en IV.3.b et sont présentés figure 69. Les mesures de ce type d'échantillon ne sont pas filtrées.

L'accord entre simulations et mesures est bon. En effet, le comportement général du motif en fonction de l'angle d'incidence est le même. Notons que le bruit augmente avec l'angle d'incidence.

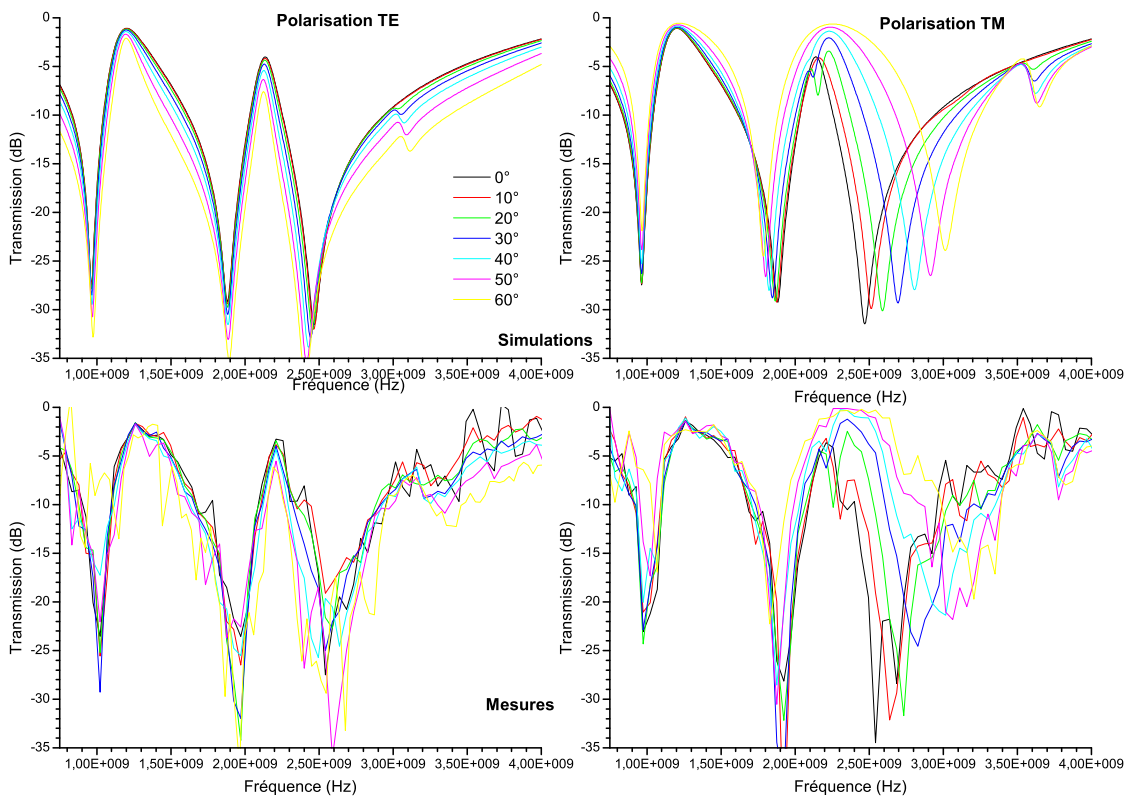


Figure 69 : Comparaison générale entre mesures et simulations pour un motif ETRI.

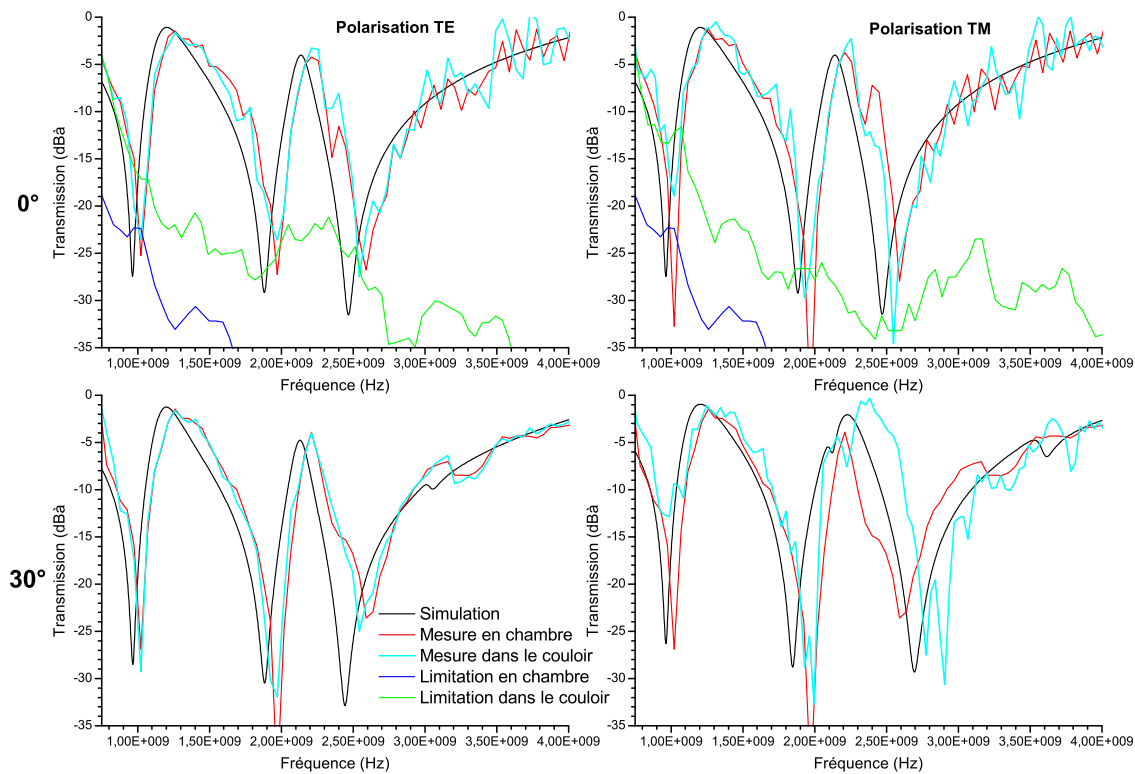


Figure 70 : Comparaison détaillée entre mesures et simulations pour un angle d'incidence de 0 et 30°.

Afin de mieux comparer les courbes, trois angles d'incidence : 0, 30 et 60° ont été choisis. Les courbes obtenues sont présentées sur la figure 70 et la figure 71. Nous comparons aussi les mesures effectuées en chambre anéchoïque et dans le couloir.

Notons que l'ensemble des courbes présente un décalage en fréquence par rapport à la simulation. Ceci est dû à la permittivité du FR4 qui est surévaluée dans les simulations pour les raisons données précédemment.

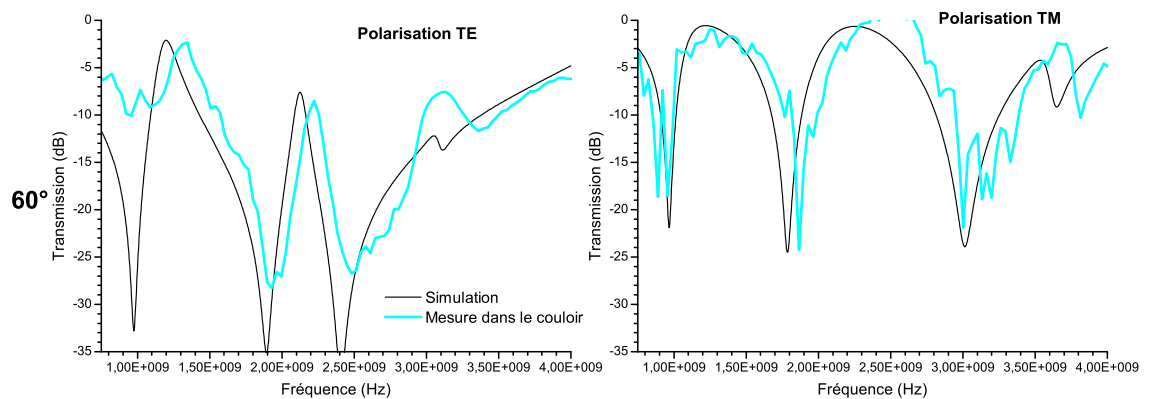


Figure 71 : Comparaison détaillée entre mesures et simulations pour un angle d'incidence de 60°.

Concernant l'accord en amplitude, beaucoup de choses sont à dire. Tout d'abord, les limitations sur la dynamique du banc permettent d'expliquer les réductions importantes d'atténuation mesurées par rapport à ce que prédisait la simulation pour la première bande rejetée. On l'observe particulièrement bien en TM à 0 et à 30° et en TE à 60°. On observe d'ailleurs qu'en chambre anéchoïque, pour ces trois courbes, l'atténuation augmente largement ce qui est conforme aux limitations.

Dans les autres cas, on observe soit un bruit important proche du pic d'atténuation qui provoque une mesure légèrement erronée en amplitude, comme c'est le cas à 30° et 60° en TM sur la troisième bande. Soit une atténuation supérieure à la limitation fixée par une tôle d'aluminium comme en TE à 0°. Il convient de rappeler que cette limitation est due à la présence de trajets multiples issus de la tôle d'aluminium et que, comme l'échantillon est ici de nature différente, il est fort possible qu'elle soit différente.

Quoiqu'il en soit, l'accord entre le niveau d'atténuation simulé et mesuré est plutôt bon et quelques cas présentent même une mesure plus performante que les simulations. Cela peut être attribué soit au bruit de mesure ou au fait que le substrat possède des pertes légèrement inférieures aux 0.025 utilisés en simulation.

La seule mesure posant un problème est celle dans la chambre, en polarisation TM à 30°. En effet, elle ne présente pas le même décalage fréquentiel par rapport à la simulation que les autres. Ce décalage n'intervient d'ailleurs que pour la troisième bande ce qui tend à prouver que ce défaut peut être attribué à un problème de mesure que nous ne pouvons justifier.

ii Répétabilité des mesures

Une question évidente et importante est : « Qu'en est-il de la répétabilité » ? Il convient donc de préciser que, tout du moins dans le couloir, de nombreuses mesures identiques ont été réalisées. Toutes présentaient, à la figure de bruit électrique près, des niveaux d'atténuation sensiblement égaux. En effet, une variabilité de l'ordre de 1 à 2dB due au bruit lié aux échos était régulièrement observée car l'environnement était régulièrement modifié (présence d'armoire métallique, de table, etc.). En revanche, comme ce bruit est principalement défini par l'environnement et que nos mesures se sont toujours déroulées avec le même positionnement, nous avons retrouvé à chaque fois des variations dues au bruit qui avaient la même forme fréquentielle. Des mesures de répétabilité seront présentées avec les échantillons papiers dans la section VI.4.bi.

Nous pouvons conclure, à l'aide de ces premières mesures, sur la validité des simulations et du banc de mesure.

iii Mesure d'un treepôle bi-bande GSM

Les dimensions du motif treepôle bi-bande GSM sont données dans le tableau 17. Cette fois-ci, nous n'avons pas pris la précaution de surévaluer la permittivité du substrat et avons travaillé avec une valeur de permittivité de 4.3.

Tableau 17 : Dimensions caractéristiques du motif treepôle bi-bande GSM réalisé sur époxy.

Paramètre	A	B	C	D	E	F	G	H
Dimension (mm)	26	9.12	0.788	7.77	0.5	4.05	11.51	5.4

Nous observons sur la figure 72, que l'accord général entre simulations et mesures, bien que réalisées en dehors de la chambre, est très bon et que la stabilité vis à vis de l'angle d'incidence est meilleure que pour le motif précédent, malgré une fréquence de fonctionnement plus basse. En effet, on voit que pour des angles

d'incidence supérieurs à 50° , le bruit de mesure est assez important et est renforcé par le mauvais fonctionnement des antennes aux fréquences proches des 800MHz. Ce mauvais fonctionnement des antennes dans la bande basse de l'étude n'a pas posé de soucis précédemment en raison des précautions prises sur la valeur de la permittivité du substrat. Au final, les performances de ce motif semblent très stables en fréquence.

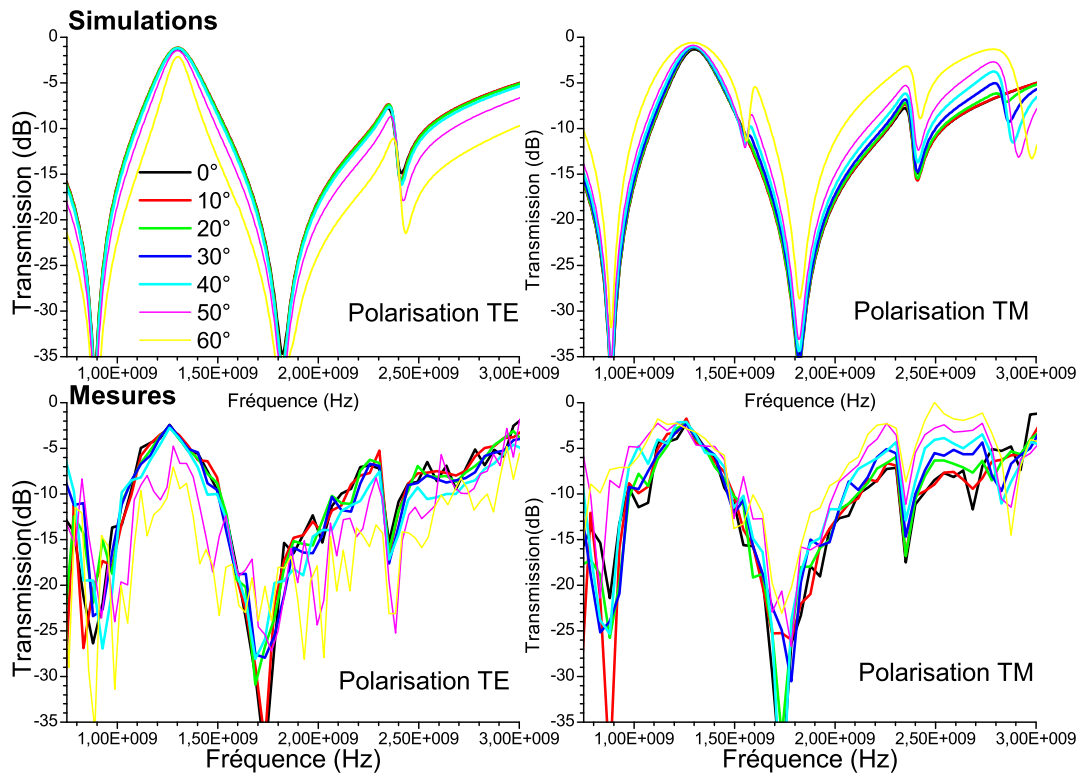


Figure 72 : Comparaison générale entre mesures en dehors de la chambre et simulations pour un motif treepôle bi-bande GSM.

Pour plus de détails, comparons de façon plus précise la mesure et la simulation pour deux angles d'incidence donnés : 0° et 45° . On peut observer cette comparaison sur la figure 73.

On observe bien que lorsque les simulations sont faites avec la bonne valeur de permittivité du substrat, les résultats de mesures et de simulations sont en meilleur accord. Cependant, un petit désaccord existe sur les fréquences rejetées : celles mesurées sont plus basses que celles simulées, contrairement à ce que nous aurions aimé.

On voit aussi que les mesures en chambre anéchoïque présentent globalement une meilleure atténuation, comme on s'y attendait. Le niveau d'atténuation atteint est

conforme aux simulations. Les performances obtenues sont meilleures qu'avec les motifs concurrents : entre 30 et 35dB d'atténuation contre 25 à 30dB pour le motif ETRI.

Notons enfin que l'on observe les mêmes aléas de mesures que sur les motifs précédents.

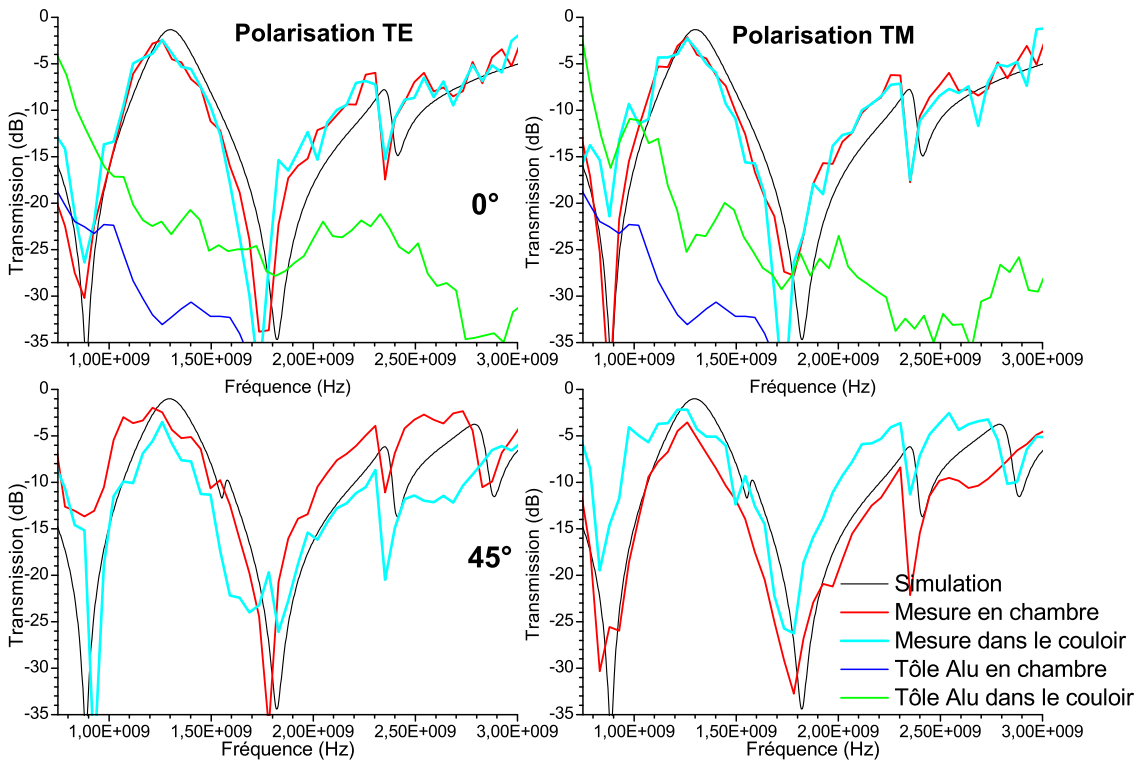


Figure 73 : Comparaison détaillée entre mesures et simulations pour un angle d'incidence de 0 et 45°.

iv Mesure d'un treepôle tri-bande GSM

Nous avons ensuite fait réaliser la version tri-bande du motif précédent. Malheureusement notre fournisseur habituel n'ayant pu honorer notre commande, un autre l'a fait et le substrat utilisé est de moins bonne qualité. En effet, les pertes variaient de 0.02 à 0.025 pour le substrat habituel contre 0.015 à 0.045 pour celui utilisé ici. Le design a été réalisé suivant les dimensions du tableau 18.

Tableau 18 : Dimensions caractéristiques du motif treepôle tri-bande GSM réalisé sur époxy.

Paramètre	A	B	C	D	E	F	G	H
Dimension (mm)	25.35	8.5	0.36	7.75	0.5	5.36	3.35	6.2

Les performances ont été mesurées de la même façon que pour les autres échantillons. Elles sont affichées sur la figure 74 et la comparaison pour les angles de 0° et de 45° sur la figure 75. Seules les mesures dans le couloir sont affichées.

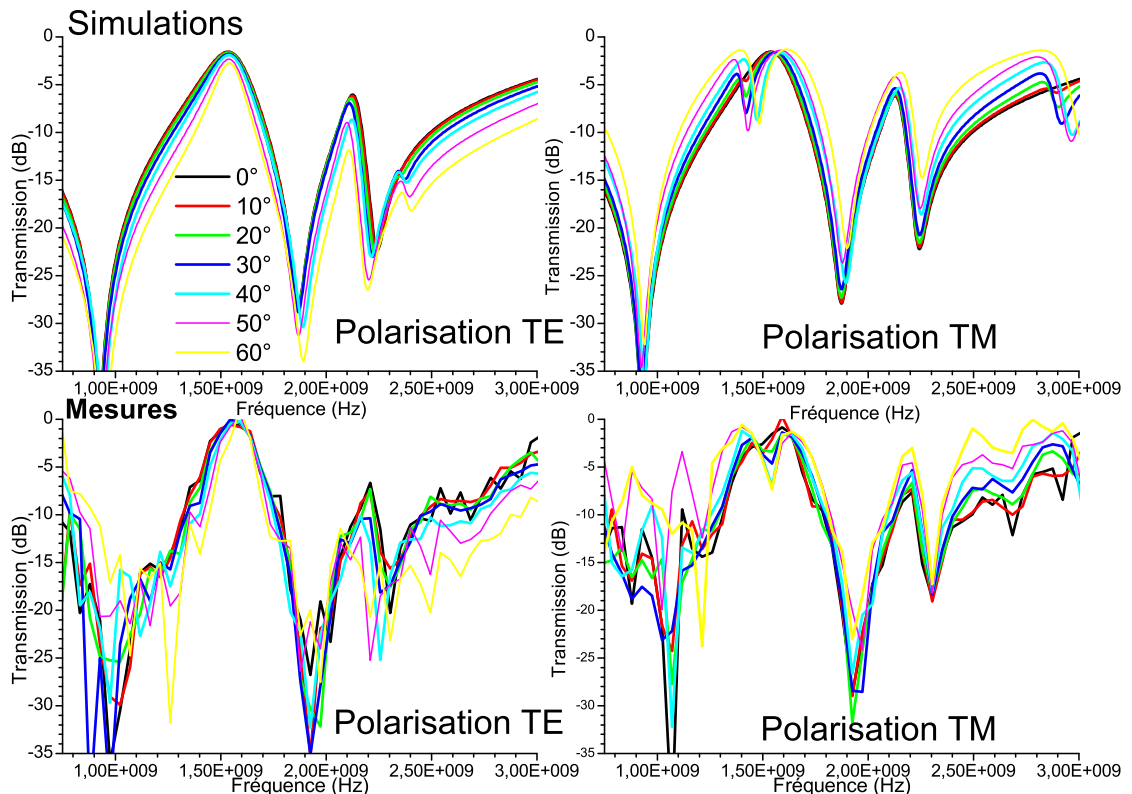


Figure 74 : Comparaison générale entre mesures et simulations pour un motif treepôle tri-bande GSM.

D'une façon générale on observe, comme à chaque fois, un très bon accord entre mesures et simulations exceptée pour la première bande qui souffre des limitations du banc de mesure. Le niveau d'atténuation générale est légèrement inférieur aux 30 à 35dB du motif précédent mais demeure cependant supérieur aux 20 à 25dB du motif ETRI excepté pour la troisième de fréquence qui présente une atténuation qui atteint tout juste les 20dB en TM et les 25 en TE.

Sur la figure 75, on observe que l'écart en fréquence se produit cette fois-ci dans le sens inverse, soit une fréquence de coupure simulée sous évaluée en raison d'une valeur de permittivité utilisée en simulation de 4.7. Concernant les différences en amplitude, on voit que pour un angle de 0° les valeurs de la première bande sont excellentes et en bon accord avec les simulations. Elles dépassent même les limitations présumées du banc que nous avons obtenues avec la plaque d'aluminium. Nous ne savons pas expliquer précisément ce phénomène. En revanche, pour un angle de 45° , du

bruit apparaît et les valeurs relevées sur la première bande concordent plus avec la limitation qu'avec les simulations. Pour toutes les autres bandes de fréquence, l'accord avec la simulation est très bon et les écarts observés sont justifiés par les mêmes causes que pour les échantillons précédents.

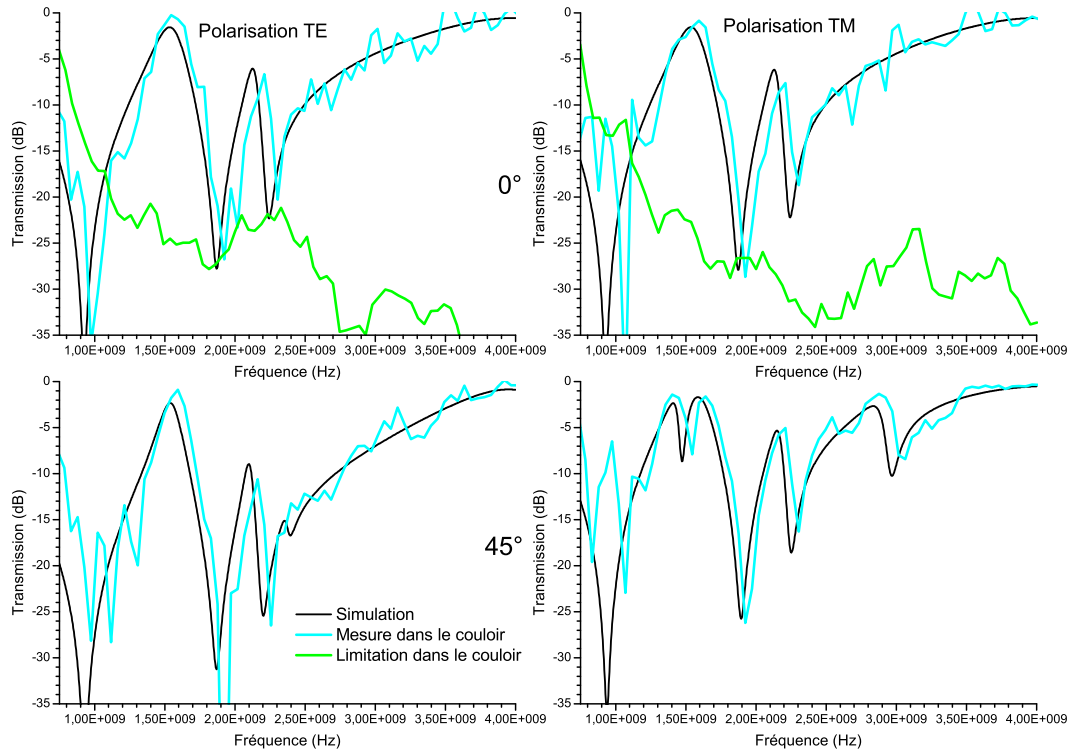


Figure 75 : Comparaison détaillée entre mesures et simulations pour un angle d'incidence de 0 et 45°.

v Mesure d'un treepôle bi-bande WiFi

Le dernier motif à tester sur époxy est le motif treepôle WiFi. Les dimensions de ce dernier sont données dans le tableau 19 et la comparaison globale entre les simulations et les mesures qui ont été faites en dehors de la chambre anéchoïque en fonction de l'angle d'incidence est présentée dans la figure 76.

Tableau 19 : Dimensions caractéristiques du motif treepôle bi-bande WiFi réalisé sur époxy.

Paramètre	A	B	C	D	E	F	G	H
Dimension (mm)	10	3.61	0.558	3	0.25	2	3.2	1.62

Comme nous pouvons nous y attendre, il s'agit du motif dont l'accord avec la simulation est le meilleur. Cela vient du fait que les fréquences mises en jeu sont plus élevées que précédemment. Les limitations imposées par le banc ont donc moins d'influence. En revanche, la limitation en dynamique existe toujours légèrement sur la

fréquence basse et justifie l'écart d'atténuation que l'on peut observer (35 à 40dB en simulation contre 25 à 35dB mesuré). Concernant l'évolution en fonction de la fréquence, l'accord est très bon aussi et c'est seulement à partir de 50° pour la bande basse en polarisation TE qu'une réduction significative d'atténuation commence à être visible sans qu'aucun décalage en fréquence n'apparaisse. Cette réduction est d'ailleurs probablement plus due au fait des limitations de mesures qui doivent augmenter avec l'angle d'incidence que due à l'angle d'incidence lui même.

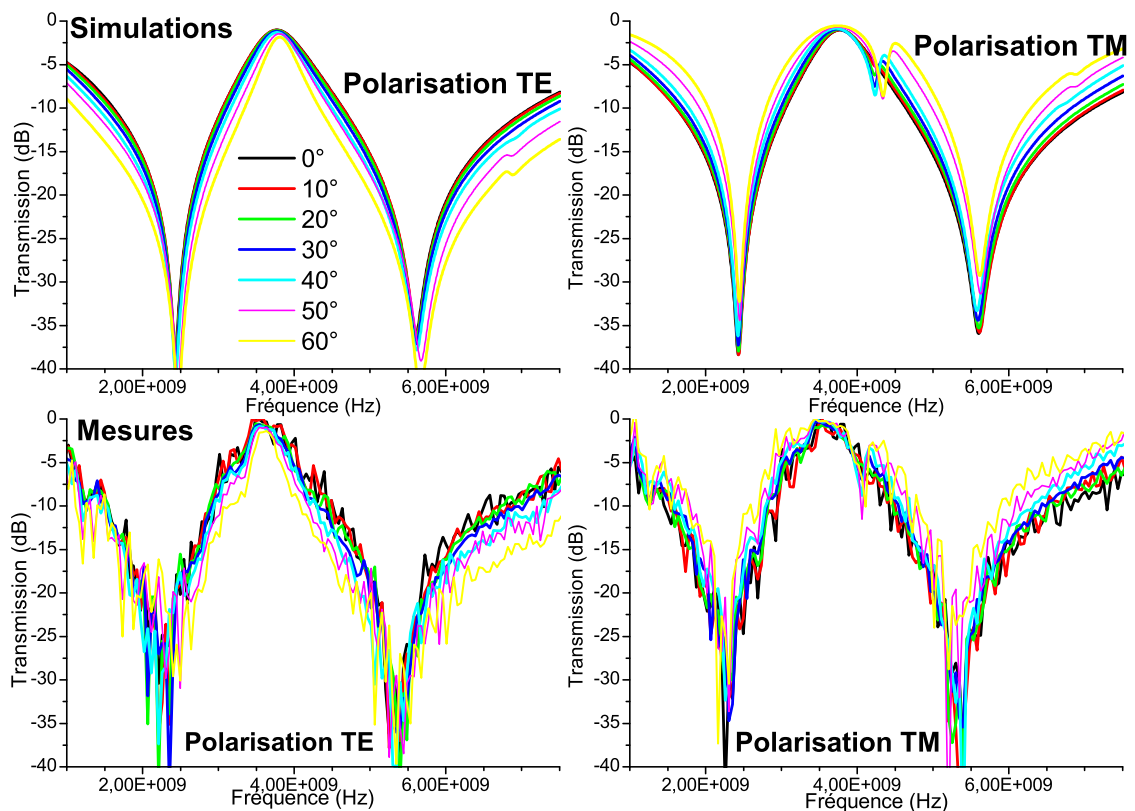


Figure 76 : Comparaison générale entre mesures et simulations pour un motif treepôle bi-bande WiFi.

La comparaison entre simulations et mesures des courbes pour des angles d'incidence de 0 et de 45° est donnée à la figure 77. L'accord en amplitude entre mesures et simulations est très bon et la présence de bruit et les différences de pertes dans le substrat par rapport à la simulation permettent d'expliquer les légères différences observées. On observe d'ailleurs que l'atténuation mesurée est assez importante et peut atteindre les 40dB. Cette fois-ci encore, comme pour le motif GSM bi-bande, aucune précaution n'a été prise sur la valeur de la permittivité du substrat et une valeur de 4.3 à été utilisée. On se retrouve donc avec un très léger décalage dans le même sens que le motif GSM bi-bande (surévaluation de la fréquence de résonance).

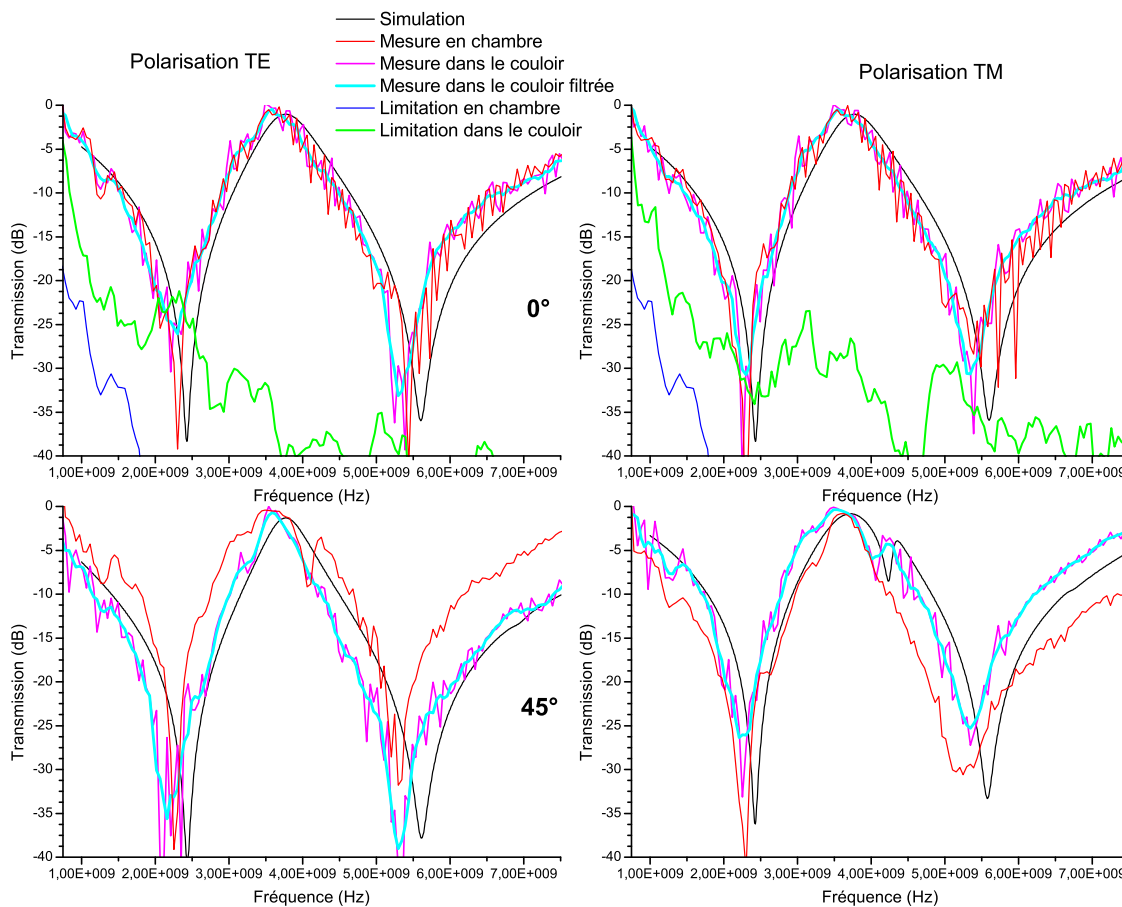


Figure 77 : Comparaison détaillée entre mesures et simulations pour un angle d'incidence de 0 et 45°.

On note enfin une grosse différence de bruit entre la mesure en chambre anéchoïque à 0° et à 45°. Il semblerait qu'un défaut de mesure dont nous ne connaissons pas l'origine ait engendré un bruit important sur la mesure à 0°.

IV.5 Conclusions

Nous avons donc vu dans cette partie la façon dont nous pouvons réaliser des mesures d'efficacité de filtrage de SSF. Nous avons pu voir qu'avec le type de banc classiquement utilisé pour la mesure de SSF, de nombreuses limitations apparaissent. Ces limitations rendent difficile la mesure d'échantillons réagissant à 900MHz. La chambre anéchoïque permet de régler en partie le problème pour certains échantillons et pour certains angles d'incidences.

Nous avons aussi vérifié la véracité de nos simulations en mesurant l'efficacité de filtrage d'échantillons fabriqués sur époxy. Nous avons ainsi pu confirmer que les motifs développés sont suffisamment performants pour l'application envisagée.

V Optimisation du procédé flexographique

V.1 Introduction

La grande majorité des travaux en électronique imprimée utilise des supports fermés ou étanches (comme le verre, le Kapton® ou encore des plastiques issus de la pétrochimie), le plus souvent traités chimiquement ou mécaniquement [143]. Peu de publication osent aborder le cas de matériaux cellulosiques, ou issus de fibres comme les non-tissés (dont on peut trouver la définition en [144]) [145] [82]. Il est bon, en effet, de savoir que la nature des supports cellulosiques peut dégrader la qualité d'impression et notamment leur état de surface [85].

L'objectif du présent travail est justement de créer des surfaces sélectives en fréquence sur des supports papiers, avec une technologie flexographique. L'adaptation de la flexographie standard aux encres conductrices sur des supports cellulosiques n'est pas triviale. L'auteur de ce mémoire n'ayant que peu de connaissances sur les technologies d'impression, un stage a été lancé sur ce sujet [146] en parallèle de la thèse. Cette partie reprend donc les principaux résultats obtenus durant ce stage et est complétée par des mesures obtenues par l'auteur ainsi que par la présentation d'une campagne d'essais industriels.

Les questions auxquelles nous répondrons sont les suivantes : quelles propriétés de surface dégradent l'impression des motifs haute résolution et quels paramètres d'impression doivent être utilisés? Quelles sont les performances atteignables ? Quels sont les supports que nous utiliserons ?

V.2 Appareil flexographique du CTP

Dans cette partie nous allons chercher à caractériser les possibilités d'impression dont nous disposons à l'aide de la machine d'impression flexographique du CTP. Cette machine, disponible dans les locaux de Douai du CTP, est couramment utilisée pour des tests d'impression standards. Dans notre cas, nous pouvons l'avoir à disposition quand les demandes ne sont pas trop fortes, et qu'une grande série d'impression est requise. Pour cela, nos essais sont souvent couplés avec d'autres projets du CTP.

V.2.a Présentation et caractérisation du matériel

i Appareil flexographique

Afin de se rapprocher des conditions proches des conditions industrielles, une machine a été développée dans les locaux du CTP. Cette machine, de la taille d'une machine de laboratoire, présente des conditions proches d'une machine d'impression industrielle. Tout d'abord, un magasin d'alimentation feuille à feuille est présent sur la machine. De plus, grâce à un système de ventouses alimentées par de l'air comprimé (cf. figure 78, repère 1), les échantillons de papier sont acheminés automatiquement vers l'impression. L'anilox, i.e. le rouleau encreur, et le cylindre porte-cliché sont facilement mis en place et démontés (cf. figure 78 repères 2 et 3).

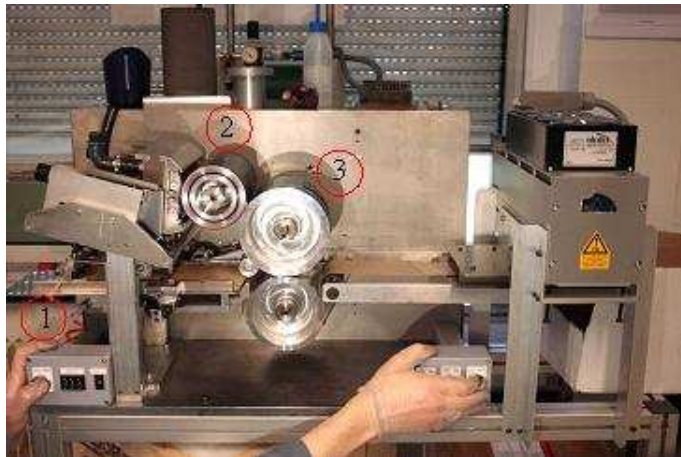


Figure 78 : Photographie de l'appareil I-Speed Flex utilisé pour recréer une impression industrielle.

Plusieurs types de séchage sont possibles avec cette machine : ultra-violet, convectif ou encore infrarouge. Enfin, un moteur pas à pas permet de lancer des séquences sans à-coups, imprimant les échantillons en quelques secondes.

On retrouve cette machine en vue schématique figure 79 avec les différents éléments principaux :

- le support d'impression, dont les caractéristiques physiques doivent être caractérisées afin de régler les paramètres d'impression ;
- le rouleau encreur, aussi appelé anilox, dont nous avons déjà vu la définition en II.3.e. Il permet de véhiculer l'encre sur le cliché. Nous devons donc connaître les caractéristiques physiques de l'encre pour le réglage des paramètres du procédé ;

- le cylindre porte cliché sur lequel est fixé le cliché à l'aide d'une mousse adhésive. Nous expliquerons en détails dans cette section de quoi il s'agit, quels types existent et quelles en seront les formes utilisées pour nos travaux ;
- les dispositifs de séchage en bout de machine.

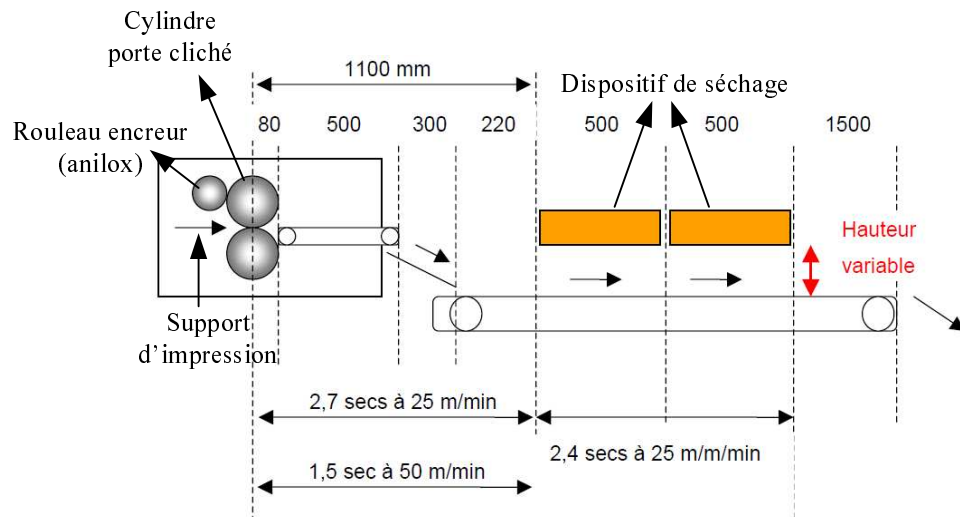


Figure 79 : Vue schématique et cotation de la machine.

Dans cette description il manque la largeur de la machine qui reste une des limitations principales. En effet, les rouleaux font 10cm de hauteur et, si l'on enlève les deux fois 1cm de marge nécessaire de chaque côté pour caler l'échantillon de papier, nous ne pourrions donc imprimer que 8cm de largeur. La deuxième limitation est fixée par le périmètre du cylindre porte cliché qui fait 30cm. A cela il faut retirer 2 fois 5cm environ de chaque côté pour le système de ventouse utilisé pour le transport des échantillons entre les différentes étapes du procédé d'impression. Au final, le cliché ne pourra donc faire que 8cm par 20cm.

ii Les supports

Dans cette étude, nous nous sommes focalisés sur des supports cellulosesques fabriqués pour l'industrie du papier-peint qui est l'application finale visée. Pour cela, la société Ahlstrom, fabricant de papier, intéressée par de telles applications, nous a fourni des références de support cellulosique qu'elle commercialise. Un autre support à été testé le carton Decarte.

La première étape fut la caractérisation de ces supports. Le tableau 20, le tableau 21 et le tableau 22 reprennent les principales caractéristiques mesurées des supports

étudiés. Pour plus d'informations sur ces mesures, le lecteur pourra se reporter au document [146]. Chacune de ces informations permettra le réglage des paramètres d'impression comme le réglage de la pression des rouleaux en fonction de l'épaisseur de chaque support.

Tableau 20 : Mesure du grammage de chaque support [146].

Référence	Germont LO	Kaemsol M	Kaemplex LW 2 LF	Ma 8109125	Ma 8825090	Decarte
Moyenne (g/m ²)	70,4	112,7	132,6	117,7	89,6	260
Ecart type (g/m ²)	0,3	0,6	0,5	0,7	0,3	1,5
Coeff. Var (%)	<1%	1%	<1%	1%	<1%	1%

Tableau 21 : Mesure de l'épaisseur de chaque support [146].

Référence	Germont LO	Kaemsol M	Kaemplex LW 2 LF	Ma 8109125	Ma 8825090	Decarte
Moyenne (µm)	70,8	155,8	196,5	367,6	117,9	321
Ecart type (µm)	1	0,9	1,3	9,6	0,7	1,8
Coeff Var (%)	1%	1%	1%	3%	1%	1%

Tableau 22 : Mesure de rugosité de chaque support obtenue à l'aide d'un PPS (Parker Print Surf) [146].

Référence	Germont LO	Kaemsol M	Kaemplex LW 2 LF	Ma 8109125	Ma 8825090	Decarte
FaceA (µm)	1,8	4,8	1,5	8,8	3	2
Ecart type (µm)	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
FaceB (µm)	4,8	5,6	5,9	8,9	7	
Ecart type (µm)	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	

Grâce à ces tableaux on voit que la gamme de papier testé est assez large. En effet, le grammage varie d'environ 70 à 130g/m² pour les papiers et la rugosité de 1.5 à presque 9µm. On note au passage que la rugosité du carton Decarte est faible et ceci peut s'expliquer par le fait qu'il ait subi un couchage. Cette caractérisation permet donc, d'après l'expérience du CTP, de confirmer que ce panel est représentatif de la grande majorité des supports existants dans le monde du papier-peint.

iii L'encre

Pour cette étude d'imprimabilité et pour tous les essais d'impression réalisés, nous utilisons l'encre «SUN AQUALINE CXT-0346 : FLEXO CONDUCTICE SILVER : BG05 ». Cette encre développée par Sun Chemical est une encre flexographique à l'eau, à base d'argent. La composition de l'encre fournie par SUN CHEMICAL est la suivante : argent (N° CAS 7440-22-4), eau (7732-18-5), IJ-4680, acrylique, dipropylène glycol méthyl éther (34590-94-8). Sa masse volumique est de 2,30g/cm³, et une fois imprimée et séchée elle est de 2,06g/cm³. Sa viscosité dynamique est constante, de valeur 0,276Pa.s.

Un passage des impressions au MEB (Microscope Electronique à Balayage) permet une visualisation plus précise des composants de l'encre. Les particules d'argent qui la composent sont sous forme de plaquette, avec un diamètre d'encombrement d'une dizaine de microns, comme le montre la photo de la figure 80.

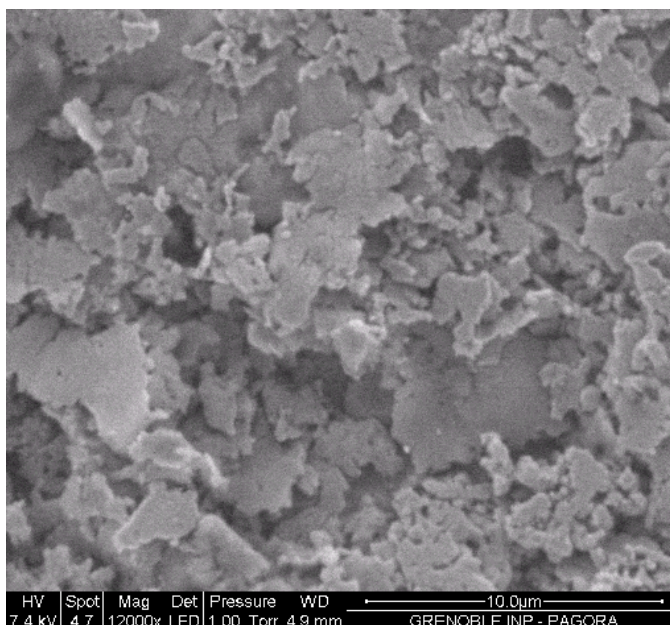


Figure 80 : Visualisation MEB de l'encre utilisée [146].

L'utilisation de cette forme de plaquette est peu courante pour ce type d'encre, même parmi celles adaptées aux basses températures de recuit [49]. En effet, la forme couramment rencontrée a été donnée figure 15. Il semblerait donc que cette disposition en plaquette soit responsable de la possibilité d'absence de recuit. Le fabricant ne communiquant bien entendu pas d'informations à ce sujet cette hypothèse reste difficile à vérifier.

iv Les clichés

La qualité d'un imprimé flexographique dépend de la nature du cliché utilisé. Différents types de clichés sont disponibles. Même si les clichés en caoutchouc sont encore utilisés de nos jours, les clichés polymères sont prédominants sur le marché. Ces clichés polymères offrent la possibilité de jouer sur des paramètres comme la dureté, le module d'élasticité en compression, la hauteur du motif ou son énergie de surface (force qui permet à un objet léger de se maintenir à la surface d'un liquide et dépend donc du liquide et de l'objet [147]). Dans cette partie, outre le motif, trois propriétés importantes sont étudiées: l'énergie de surface, la dureté et l'épaisseur.

Les duretés des clichés n'ont pas été mesurées, elles sont fournies par ASAHI, le fabricant. Nous sommes partis sur trois clichés de dureté différente. Un code couleur est mis en place pour la distinction de chaque cliché (cf figure 81). Le cliché jaune, principalement utilisé pour les essais, a une dureté de 69°Sh (exprimée en dureté Shore). Le cliché bleu a une dureté de 62°Sh. Enfin le dernier cliché, le cliché orange, a une dureté de 73°Sh.

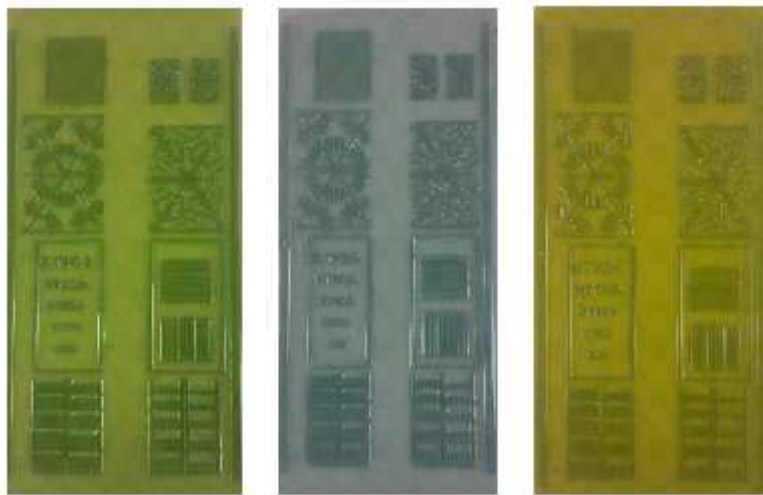


Figure 81 : Photographie des trois clichés utilisés.

Les énergies de surface, présentées dans le tableau 22, ont été calculées via des mesures d'angle de contact. Elles nous aident à comprendre les phénomènes de surface et d'adhésion qui se passent entre l'encre et le support d'adhésion (le cliché). On peut ainsi prédire si l'encre est susceptible d'être retenue par le cliché ou de ne pas adhérer sur ce dernier. Ces deux phénomènes extrêmes peuvent être la cause de défauts d'impressions majeurs.

Tableau 23 : Energies de surface des différents clichés [146].

	Jaune (69°Sh)		Bleu (62°Sh)		Orange (73°Sh)	
	Semelle	relief	semelle	relief	semelle	relief
Energie de surface (mJ/m ²)	31,99	30,8	33,81	32,4	30,87	27,08
Ecart type (mJ/m ²)	1,28	1,23	1,35	1,29	1,23	1,08

Cette mesure a permis, à l'aide du savoir technique dont dispose le CTP, de constater que l'encre pourrait bien être imprimée à l'aide de ces clichés. Etant donné qu'ils ont tous une énergie de surface sensiblement différentes et donc, que l'adhérence de l'encre sera plus ou moins bonne en fonction du cliché à préférer, nous saurons vers quoi doit tendre le cliché pour des essais futurs. En l'occurrence, et grâce, là encore, au savoir développé par le CTP, le cliché jaune donne les meilleurs résultats d'imprimabilité (très peu de manque d'encre constaté). Or, ce cliché est l'intermédiaire. Ce qui prouve que la gamme de dureté et d'énergie de surface utilisée est bien la bonne.

v Mousse adhésive

Lors de l'impression, le cliché est fixé au cylindre porte-cliché grâce à une mousse adhésive d'épaisseur et de dureté connue elle aussi. Si l'épaisseur du complexe mousse-cliché n'est pas maîtrisée, des surpressions au niveau des interfaces entre rouleaux s'exercent (NIP), écrasant et déformant le cliché par la même occasion. On voit alors apparaître des déformations du point ou des élargissements du point.

Pour le confort des essais, et pour diminuer le nombre de facteurs du plan d'expérience, une seule mousse a été utilisée : la mousse TESA BLEU 52020 d'une épaisseur de 500µm. L'épaisseur du complexe mousse/cliché est de 2,2mm. Pour le cliché orange, une manille (cale) est utilisée pour compenser le manque d'épaisseur. On trouve dans la figure 23 les épaisseurs totales pour chaque cliché. Ces valeurs sont essentielles pour le réglage du procédé d'impression et doivent donc apparaître pour la reproductibilité de nos essais.

Tableau 24 : Epaisseurs des différents clichés et de leur relief [146].

	Jaune (69°Sh)		Bleu (62°Sh)		Orange (73°Sh)	
	semelle	e _{totale}	Semelle	e _{totale}	semelle	e _{totale}
Moyenne (µm)	788,1	1704,3	817,8	1688,6	540,9	1131,5

vi Images du cliché

Un premier cliché a été utilisé pour tester différentes situations que l'on peut rencontrer lors d'une impression en flexographie, ainsi que les performances que l'on pourra obtenir. Les formes définies sur ce cliché sont visibles figure 82.

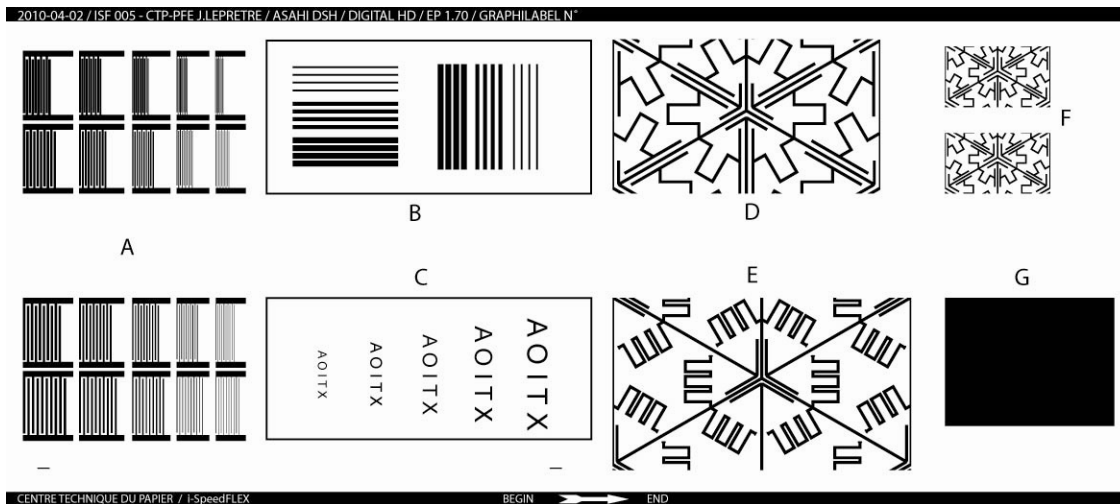


Figure 82 : Première forme test utilisée.

La forme A permet de mesurer la résolution comme nous le verrons à la section V.2.bii. A savoir, ici, la largeur minimum de ligne imprimable ainsi que l'écartement minimum entre deux lignes. La forme B permettra de vérifier que les résultats obtenus pour la résolution sont valables dans le sens d'impression et le sens travers. La forme C permet, quant à elle, de vérifier l'imprimabilité visuelle de différents angles. Pour cela, l'impression des caractères AOITX est un moyen couramment utilisé dans le monde de l'impression. Ensuite, les formes D, E et F (en double pour des problématiques logicielles non détaillées ici), sont des cellules élémentaires de certains de nos motifs. Nous vérifierons ainsi leur imprimabilité tant visuelle qu'électrique. Enfin, la forme G est utilisée pour simplifier la mesure de conductivité (difficile sur les formes définies) et pour vérifier l'encrassement de la machine.

Un autre cliché a ensuite été utilisé pour les premières mesures de performances du métapapier. Le motif utilisé est donné figure 83.

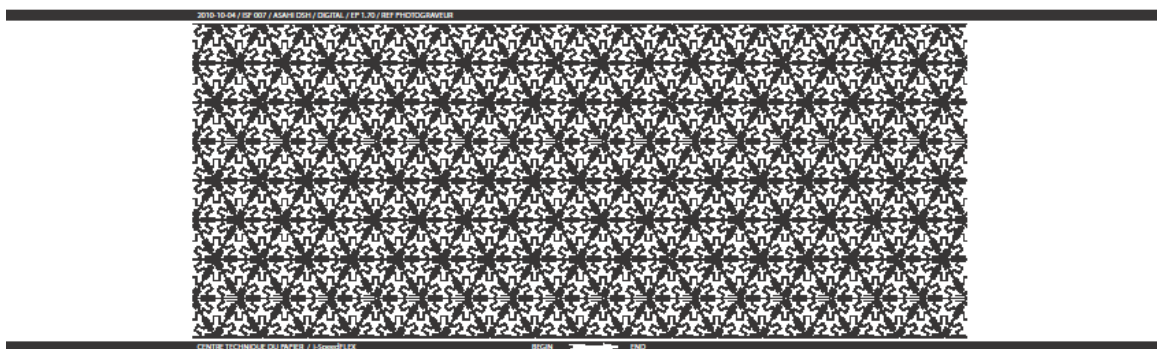


Figure 83 : Cliché utilisé pour l'impression labo de SSF (motif treepôle WiFi).

On note d'ailleurs que ce motif comporte un nombre entier de cellule dans la largeur et la longueur. C'est en effet important pour nos mesures comme nous le verrons dans la section VI.2. Cependant, nous sommes en droit de nous demander si les dimensions du motif, « imposées » par le cahier des charges n'ont pas, ou ne doivent pas, être modifiées pour qu'un nombre entier de cellules corresponde au format d'impression soit 8cm par 20cm. En l'occurrence, les dimensions de la forme test définies ont été modifiées et pas l'inverse. En effet, la largeur fait environ 8.2cm et la longueur 18cm. Nous avons en effet pu gagner un peu sur les marges en largeur pour faire rentrer 4 cellules élémentaires, tandis qu'en longueur, nous n'avons pas pu réduire suffisamment les marges pour faire rentrer une cellule élémentaire supplémentaire. Nous avons donc diminué la taille de l'échantillon à imprimer. Le compromis fait n'a cependant pas modifié les dimensions de notre motif et n'a pas, ou très peu, diminué la taille de l'échantillon à tester. Nous verrons dans la section V.3.a ce qu'il en est lorsque ce compromis ne peut être trouvé, notamment sur des machines industrielles.

V.2.b Principaux résultats de l'étude au stade labo

i Paramètres testés

Selon nos objectifs, les possibilités de la machine ainsi que les contraintes, les paramètres suivants ont été choisis, a priori pour la première partie de l'étude :

- la linéature, ou le volume, de l'anilox : trois anilox sont utilisés, $4,5\text{cm}^3/\text{m}^2$, $20\text{cm}^3/\text{m}^2$ et $25\text{cm}^3/\text{m}^2$;
- la vitesse de la machine : 30m/min, 50m/min et 90m/min ;
- la température de séchage : 25°C et 60°C avec un séchage convectif ;

- la puissance de soufflerie : 0%, 50% et 100% ;
- la dureté du cliché : 62°Sh, 69°Sh et 73°Sh ;
- l'épaisseur du complexe cliché/mousse : 2,2mm ;
- la distance entre l'impression et le premier sécheur : 1100mm.

Tous ces paramètres sont réglables sur place, et ne demandent aucune soustraitance extérieure au projet. Pour cette première étude, rappelons que les performances qui nous intéressent sont principalement la qualité d'impression (visualisable au microscope), l'épaisseur d'encre et le profil d'épaisseur (mesurée grâce à un dispositif optique appelé Topo3D [146]), la conductivité du film déposé (mesurées grâce à un dispositif 4 pointes [146]). Le *TOPO3D* est basé sur le principe d'interférométrie en lumière blanche et a été développé par le CTP pour l'analyse de matériaux diffusants tel que le papier. Il scanne une surface de quelques micromètres carrés et donne une représentation 3D couleur des variations de hauteur. L'épaisseur d'encre, et sa répartition sur un profil à définir, ainsi que la largeur de ligne peuvent être mesurées grâce à ce système.

ii Résolution

Concernant la meilleure résolution possible avec le matériel mis à notre disposition, nous avons utilisé le motif A de la figure 82 dont le descriptif et la façon de l'utiliser est donné en annexe C. Les différents essais montrent que la résolution minimale, tous paramètres confondus, est de 50 μ m pour une ligne et de 200 μ m pour l'espacement entre lignes. En dessous de ces résolutions, des lignes discontinues ou une interconnexion non désirée entre différentes lignes apparaissent. La valeur de l'espacement entre lignes doit cependant être augmentée à 250 μ m en raison du phénomène de halo qui provoque un étalement supplémentaire de l'encre (explicité dans la section suivante V.2.biii, à l'aide de la figure 86 et de la figure 87).

iii Epaisseur déposable et répartition d'encre

Le premier paramètre examiné est le volume théorique des anilox. Plus il est grand, plus on dépose d'encre. Ceci devrait permettre, théoriquement, une épaisseur d'encre plus élevée. Pour vérifier ceci, nous avons effectué plusieurs séries de mesure d'épaisseur à chaque fois, sur des échantillons imprimés avec des tailles d'anilox

différentes. Ces mesures ont été faites à l'aide du Topo3D et du bord de la forme G de la figure 82. En effet, l'appareil de mesure n'étant capable que de mesurer des différences d hauteurs sur quelques micromètres carrés, nous avons besoin de nous placer à un endroit où le papier seul sera visible ainsi que l'encre.

Le constat prédit se vérifie. En effet, la différence d'épaisseur mesurée entre des anilox de $4,5\text{cm}^3/\text{m}^2$ et de $20\text{cm}^3/\text{m}^2$, figure 84, est d'environ $5\mu\text{m}$. Elle passe d' $1\mu\text{m}$ environ, pour un anilox de $4,5\text{cm}^3/\text{m}^2$, à $6\mu\text{m}$ environ avec un anilox de $20\text{cm}^3/\text{m}^2$. En revanche, l'utilisation d'anilox de $25\text{cm}^3/\text{m}^2$ par rapport à un de $20\text{cm}^3/\text{m}^2$ ne démontre pas de profonds changements.

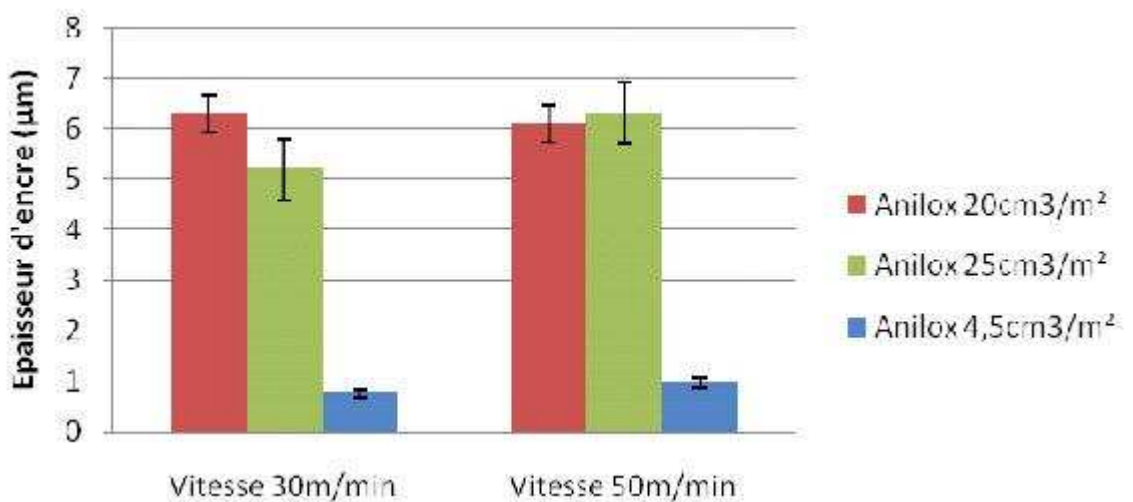


Figure 84 : Influence de la linéature des anilox sur l'épaisseur d'encre déposée (dureté du cliché 69°Sh , carton Decarte) [146].

En revanche, des mesures complémentaires, réalisées de la même façon mais cette fois-ci sur les motifs D, E ou F de la figure 82, ont été effectuées par l'auteur. Elles montrent que de profonds changements de répartition de l'encre ont lieu malgré une épaisseur d'encre sensiblement identique.

Ces mesures ont permis de mettre en évidence un problème dit de « halo » similaire au « coffee ring » bien connu des imprimeurs en jet d'encre et décrit figure 85. Il s'agit d'un phénomène qui concentre l'encre sur les contours de l'impression et non sur les bords comme avec le coffee ring. Ce problème apparaît en flexographie lorsque les tailles d'anilox sont importantes comme c'est le cas ici. Un compromis entre l'épaisseur d'encre et l'importance du problème devra donc être trouvé. Pour cela, une seconde étude du fonctionnement électromagnétique en fonction des tailles d'anilox est

effectuée et les résultats sont exposés dans la section VI.3.a.ii. En revanche, il convient dans cette partie de montrer ce phénomène et de donner les grandes lignes d'optimisation pour le réduire.

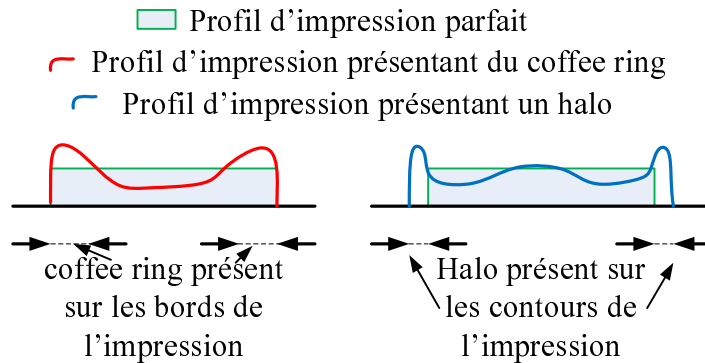


Figure 85 : Représentation schématique du problème de coffee ring et de halo.

On peut voir à la figure 86, une mesure sur un échantillon qui possède ce phénomène de halo. Cet échantillon consiste en un Y imprimé sur le papier-peint référencé Kamplex LW 2 (K2). Il est clair, sur la représentation couleur, que la hauteur est plus importante sur les contours du motif en forme de Y. Une courbe de la hauteur le long du segment AA est aussi affichée à la figure 86b. Elle montre deux régions d'environ $100\mu\text{m}$ chacune sur les contours du motif en forme de Y qui ne devraient pas exister et qui concentrent la plus grosse partie de l'encre. L'épaisseur y est en effet d'environ $4\mu\text{m}$. En revanche, au cœur du motif, la hauteur d'encre est plus petite (proche de $1\mu\text{m}$) et quasiment égale à 0 à certains endroits. Ainsi, la largeur désirée du motif imprimé a augmenté à environ $300\mu\text{m}$, car il peut être vu comme deux lignes de largeur $100\mu\text{m}$ séparées par un espace de $100\mu\text{m}$, au lieu d'une seule ligne de $250\mu\text{m}$ comme attendu. Cet effet a été mesuré en laboratoire avec un anilox de $25\text{cm}^3/\text{m}^2$.

Après optimisation du procédé (voir la section V.3.a), de meilleurs résultats ont été obtenus. Cette situation est illustrée sur la figure 87 qui montre que l'effet de halo est considérablement réduit. La largeur de la ligne le long du segment AA est la valeur souhaitée. L'effet de halo est maintenant confiné à deux zones d'une largeur de moins de $25\mu\text{m}$ et d'épaisseur d'encre de $4\mu\text{m}$. Dans la partie centrale du segment AA, la hauteur d'encre est cette fois-ci de $4\mu\text{m}$. Cet effet a été mesuré sur un échantillon issu des essais industriels avec un anilox de $13\text{cm}^3/\text{m}^2$.

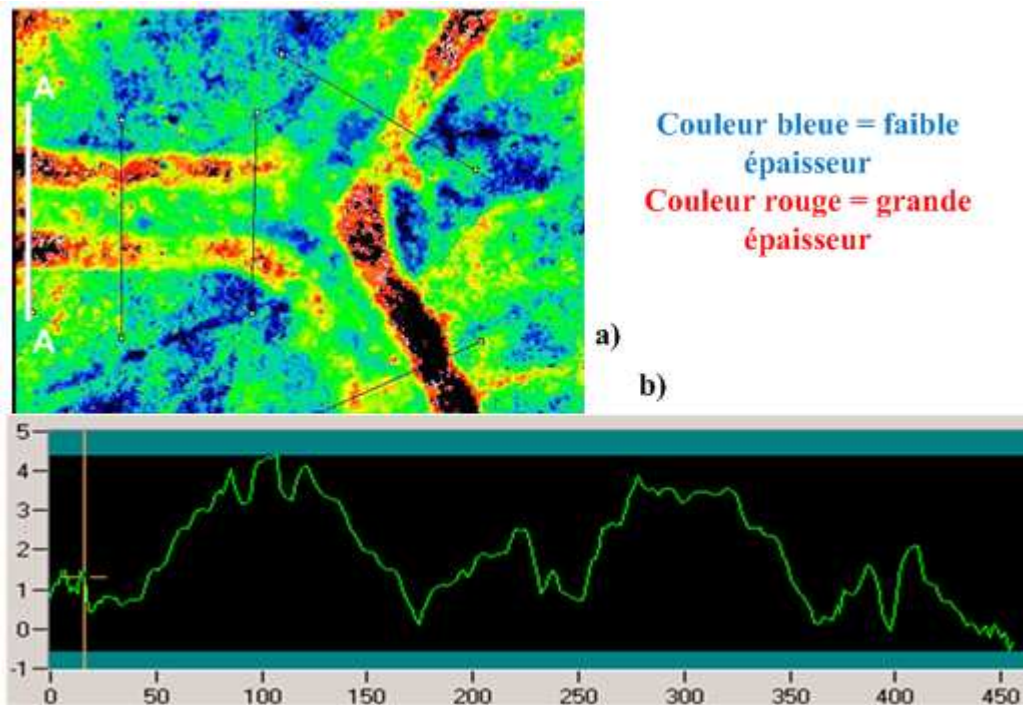


Figure 86 : Mesure de la hauteur faite avec le Topo3D sur un prototype qui a le phénomène de halo. La forme est un Y. a) Photo couleur de la hauteur, b) variations de hauteur le long du segment rectiligne AA.

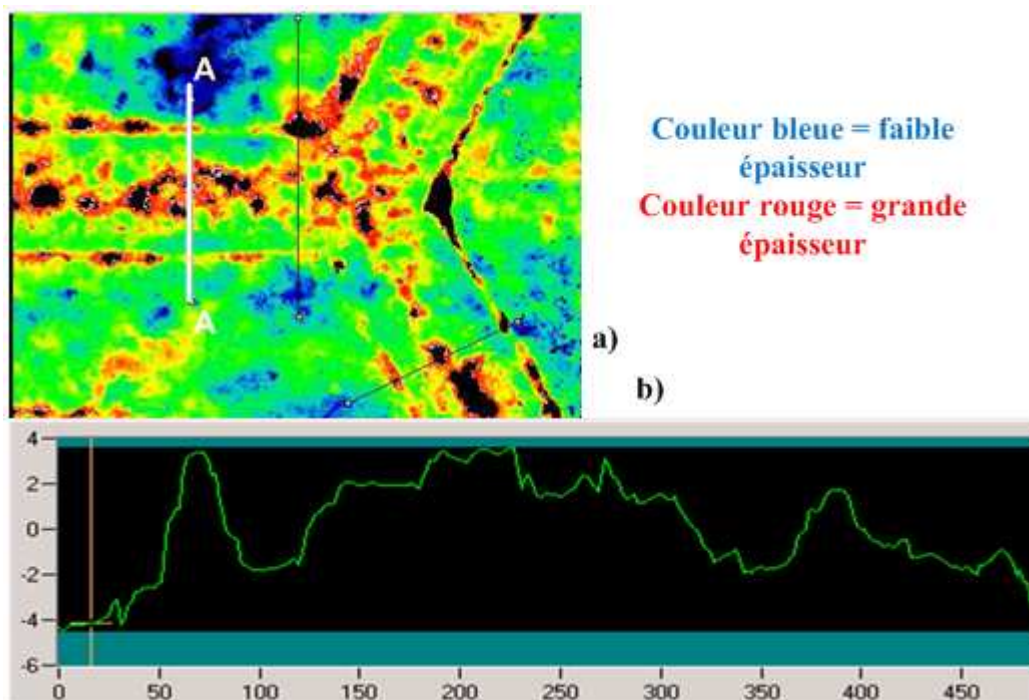


Figure 87 : Mesure de la hauteur faite avec le Topo3D sur un prototype optimisé. La forme est un Y. a) Photo couleur de la hauteur, b) variations de hauteur le long du segment rectiligne AA.

Il est cependant important de préciser que la hauteur mesurée d'une ligne conductrice n'est pas sa hauteur totale. En effet, avec l'appareil, seule l'élévation en

hauteur par rapport au niveau de la feuille de papier est accessible. Il y a probablement de l'encre à l'intérieur du papier qui contribue à la conductivité électrique. Cette partie n'a cependant pas pu être mesurée.

La seconde caractéristique étudiée dans cette partie est la vitesse d'impression. Cependant, les différences de pression engagées rendent délicates les analyses des résultats. De plus, les faibles variations d'épaisseur et la présence d'écarts-type importants pour des vitesses de 50m/min ne permettent pas de garantir l'influence de la vitesse d'impression sur l'épaisseur d'encre. Cependant, une tendance globale laisse à penser que l'augmentation de la vitesse d'impression diminue l'épaisseur d'encre déposée, quelle que soit la dureté du cliché.

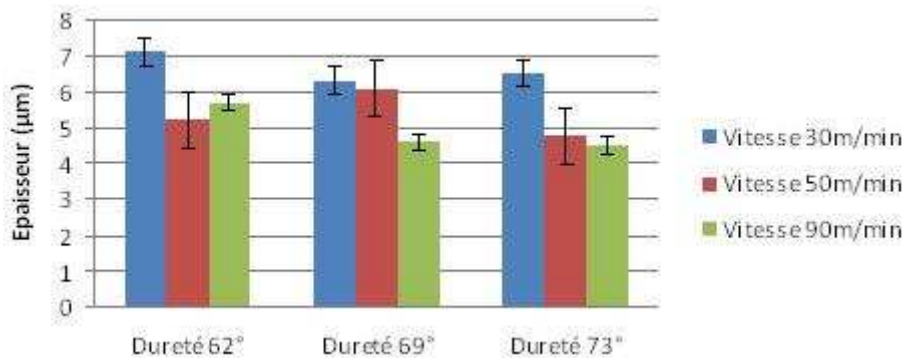


Figure 88 : Influence de la vitesse d'impression sur l'épaisseur d'encre déposée (anilox 20cm³/m², carton Decarte) [146].

Les différents essais issus de [146] montrent qu'une dépose de 5 à 6µm d'encre conductrice serait donc envisageable sur des impressions larges comme la forme G de la figure 82. Suite à d'autres mesures sur des impressions plus fines réalisées au topo3D, une dépose de 3 à 5µm serait plus réaliste comme le montre la figure 87b.

iv Conductivité

De la même façon que pour l'épaisseur d'encre, nous allons étudier dans un premier temps l'impact de l'anilox, i.e. de la quantité d'encre déposée, sur la conductivité. Pour cette mesure l'appareil 4 pointes à été utilisé sur la forme G de la figure 82 afin de faciliter la mise en place des pointes. En effet, sur nos motifs (D, E ou F figure 82) la largeur de ligne ne fait que 0.5mm ou 0.25mm et le positionnement des pointes est alors difficile.

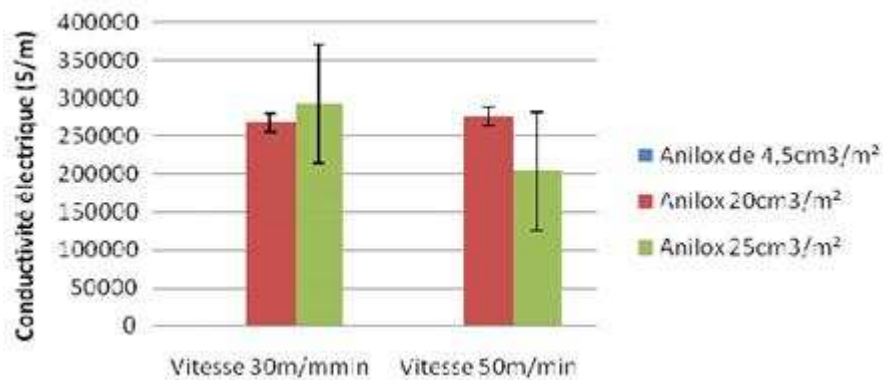


Figure 89 : Influence du volume théorique de l'anilox sur la conductivité (cliché 69°Sh, carton Decarte) [146].

Pour les anilox habituellement utilisés pour l'impression graphique, $4.5\text{cm}^3/\text{m}^2$, la dépose d'encre est insuffisante pour assurer une conductivité électrique. Des visualisations optiques complémentaires ont d'ailleurs permis de constater la discontinuité du film d'encre. Les anilox de $20\text{cm}^3/\text{m}^2$ et de $25\text{cm}^3/\text{m}^2$ utilisés par la suite donnent une conductivité sensiblement égale (malgré des différences de mesure et des écarts types importants). La logique veut en effet que si le matériau déposé est en quantité suffisante pour garantir un film continu, il aura les mêmes propriétés conductrices à chaque fois. Il en va de même pour la vitesse d'impression. Toutes celles testées permettent une dépose de film continu. Quant à la conductivité, elle est tout le temps du même ordre de grandeur, soit 10^5 S/m, quelle que soit la vitesse.

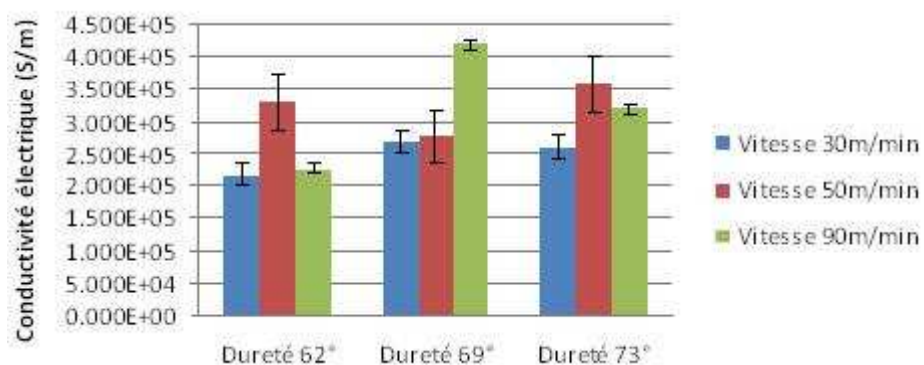


Figure 90 : Influence de la vitesse d'impression sur la conductivité électrique (anilox de $20\text{cm}^3/\text{m}^2$, carton Decarte) [146].

Les différences de conductivité entre les différents essais sont probablement dues à des problèmes de dépose d'encre sur le papier non uniforme. Ceci va influencer

la mesure d'épaisseur qui est une donnée nécessaire pour convertir une résistivité en Ohm/sq, donnée par la mesure 4 pointes, en conductivité en S/m.

Quoi qu'il en soit, les essais issus de [146] montrent qu'une conductivité comprise entre 2.2×10^5 et 4.9×10^5 S/m est atteignable. En revanche, lorsque les mesures sont effectuées non pas sur des aplats mais sur les lignes de 250µm de largeur, la conductivité est divisée par 10. Cette baisse sensible de la conductivité pourrait être due au phénomène de halo. En effet, trois phénomènes physiques sont possibles. Soit le phénomène de halo provoque une répartition inégale de l'encre trop importante vis à vis de la largeur de la ligne qui influence la conductivité. Soit il empêche de faire une mesure correcte en raison de la largeur des pointes de l'appareil de mesure qui est trop importante par rapport à la largeur des lignes. Soit cela empêche un positionnement correct au cœur de la ligne, là où les faibles variations de hauteur d'encre influenceront peu la mesure. Il est aussi possible qu'en fonction des essais les deux possibilités interviennent en même temps. Enfin, une troisième possibilité est que la conductivité du lot d'encre utilisé pour les premiers tests soit différente de celle du lot d'encre utilisée pour l'impression de SSF sur lesquelles ont été faites les mesures sur les lignes. En effet, comme l'encre doit être diluée avant utilisation il est possible qu'une erreur de manipulation soit intervenue. Cela aurait alors légèrement modifié le rapport de dilution et ainsi influencé la mesure de la conductivité.

v Supports d'impression

Concernant les supports, les essais et les principaux résultats ont été donnés pour le carton Decarte. Pour les autres supports, des essais préliminaires ont montré que seuls les papiers Kaemplex LW sont imprimables dans les conditions de laboratoire. Au vu de cela, une nouvelle référence de papier a été ajoutée, Kaemplex LW3 (K3), et ce afin de vérifier si une différence, en termes de profil d'épaisseur et d'efficacité de filtrage, existe entre les références K2 et K3. Elles présentent les mêmes caractéristiques mais K3 a la particularité d'avoir subi deux étapes de couchage ce qui diminue encore la rugosité et améliore l'imprimabilité.

La machine utilisée ne permet pas un réglage correct des pressions appliquées. De ce fait, les papiers les plus fins ne peuvent être utilisés. Elle est alimentée feuille par feuille et certains papiers collent aux clichés. Enfin, certains papiers étaient trop

absorbants et les encres s'infiltraient dans le papier. Cette caractéristique semble d'ailleurs avoir de l'importance [148] mais, dans notre cas, étant donnés les papiers utilisables pour nos impressions nous ne l'étudierons pas.

A part le dernier défaut, tous les autres sont rectifiables sur une machine industrielle et certains papiers pourraient faire l'objet d'essais futurs sur des machines industrielles.

vi Recuit

Des essais avec différentes températures de recuit ont eu lieu mais ils ont montré qu'un simple séchage à l'air produisait les mêmes conductivités. Ne disposant pas d'information du constructeur sur les températures de recuit nécessaire à l'encre pour atteindre la conductivité optimale, nous pouvons faire deux suppositions. Soit l'encre est adaptée aux basses températures et la conductivité obtenue est optimale (supposition la plus conforme aux dires du fournisseur), soit la puissance de nos sècheurs ne permet pas d'atteindre les températures adéquates de recuit de l'encre. Dans tous les cas, la conductivité obtenue lors d'impression de SSF est assez faible et, bien que des problèmes de mesures puissent être responsables de ce défaut, une solution serait de changer d'encre. Il est fait état dans la littérature d'encre à base de particule d'argent ayant de meilleures performances et de faible température de recuit [48][49][149].

vii Dureté du cliché et pression mise en jeu

Une autre grandeur qui joue sur la qualité d'impression est la dureté du cliché. Cette donnée est à mettre en relation avec la pression exercée sur celui-ci, qui est, malheureusement, difficilement mesurable. De ce fait, une exploitation des résultats en fonction de la dureté des clichés n'a pas pu être réalisée. Une étude plus poussée sur les pressions à mettre en jeu et la dureté des clichés à utiliser devrait être envisagée dans le futur, et ce, sur une machine industrielle. Des essais complémentaires ont cependant permis de montrer qu'une augmentation de la pression et une diminution de la taille de l'anilox avait tendance à réduire le phénomène de halo et aussi augmenter le transfert d'encre du cliché au papier.

viii Résumé des résultats essentiels

Les premières études préliminaires, entreprises au cours d'un stage, ont permis de montrer la faisabilité de l'impression d'encre électronique en laboratoire sur une famille de papier, Kaemplex LW, et sur un type de carton standard. Les principaux résultats font état, dans le cas idéal, d'une épaisseur maximale de 5 à 6 μm d'encre ayant une conductivité d'environ $3 \times 10^5 S/m$. En revanche, des résultats complémentaires sur les impressions de SSF font état de valeurs légèrement inférieures : 4 à 5 μm d'encre ayant une conductivité d'environ $3 \times 10^4 S/m$.

V.3 Essais industriels

V.3.a Présentation des essais industriels

L'exploitation des résultats obtenus en laboratoire permet de définir la plage des paramètres à utiliser pour une campagne d'impression industrielle. Il est important de comprendre que ce type de campagne ne peut se faire que très rarement compte tenu du coût de l'opération. En effet, outre des bobines de papier d'un kilomètre de long et les heures de location machine, le plus cher est l'encre. Les machines industrielles sont faites de telle sorte qu'elles ne peuvent démarrer qu'avec un réservoir d'encre rempli. Or, pour une machine industrielle flexographique un réservoir d'encre peut contenir jusqu'à 10L. Sachant que l'encre utilisée est de densité 3 il faudra donc 30kg d'encre pour remplir le réservoir. Enfin, sachant que l'encre à base d'argent se négocie aux alentours des 1k€/kg, on comprend que le nombre d'essais soit limité.

Les essais industriels ont pour but d'améliorer les performances obtenues lors des essais en laboratoire et d'obtenir des échantillons de taille plus importante. Pour cela, quatre essais différents d'impression ont été lancés :

- essai avec un anilox de $13\text{cm}^3/\text{m}^2$;
- essai en deux passes, une première avec un anilox de $16\text{cm}^3/\text{m}^2$ puis une seconde avec un anilox $13\text{cm}^3/\text{m}^2$;
- essai avec un anilox de $30\text{cm}^3/\text{m}^2$;
- essai sur la face non couchée du papier avec un anilox de $30\text{cm}^3/\text{m}^2$.

Ils ont été menés sur une machine flexographique industrielle utilisée habituellement pour l'impression sur du packaging alimentaire dans les locaux d'une société sous-traitante du CTP (figure 91 et figure 92). Les paramètres d'impression ont été ajustés grâce aux travaux préliminaires [146] mais ne sont pas connus précisément hormis la vitesse d'impression qui est de 9m/min. La largeur de laize est de 26.5cm. Les pressions mises en jeu sont plus importantes que pour les essais en laboratoire. Pour chaque essai, plusieurs dizaines de mètres de papier sont imprimés et livrés sous forme de rouleaux.

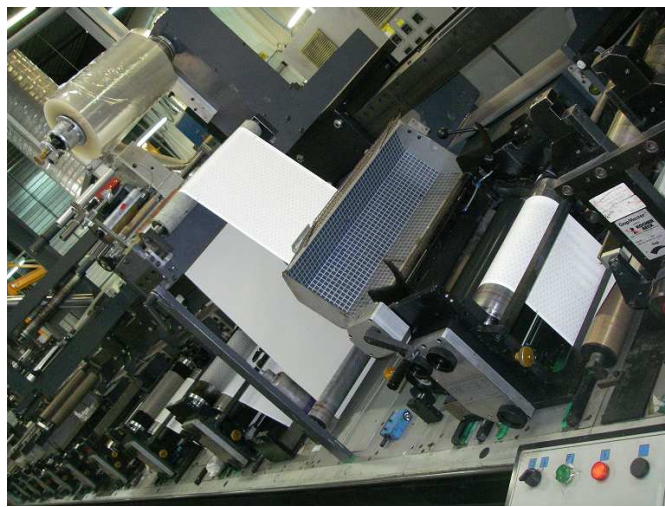


Figure 91 : Vue d'ensemble de la machine d'impression flexographique utilisée.

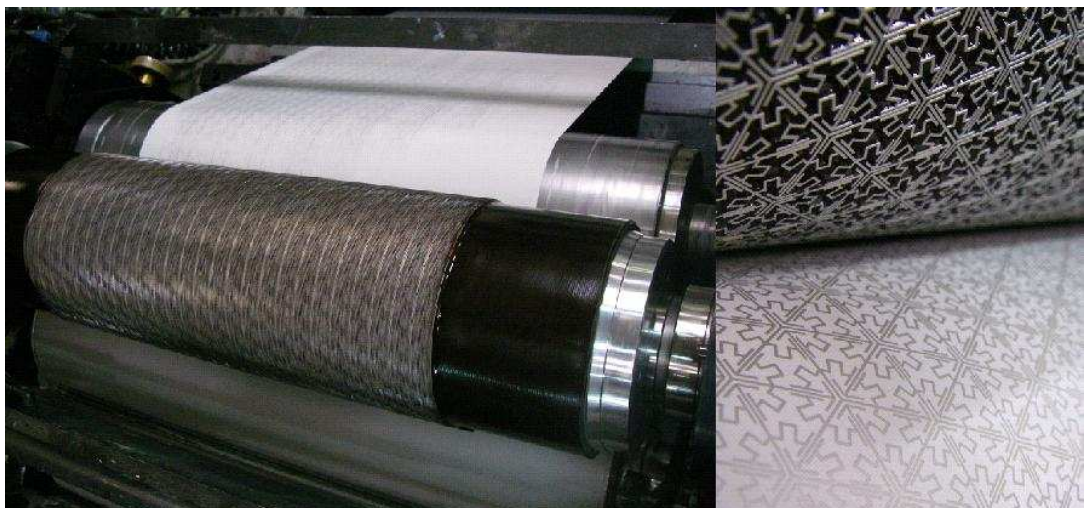


Figure 92 : Vue d'un poste d'impression en fonctionnement à gauche et du cliché à droite.

Le motif imprimé n'a subi que de très légères modifications par rapport à celui produit en laboratoire et les simulations appliquées à l'un peuvent l'être à l'autre. En effet, pour imprimer de façon industrielle, le cliché doit faire le tour du cylindre le

supportant et sa taille doit donc parfaitement correspondre au périmètre du cylindre en question. Fort heureusement, cela n'a conduit qu'à augmenter de 30 μ m la taille du tronc du treepôle d'où un fonctionnement identique dans les deux cas. Si cette possibilité n'avait pas existé, il aurait fallu fabriquer un cylindre de taille spécifique en fonction de nos motifs. Cette opération reste cependant exceptionnelle car coûteuse et nécessite parfois une adaptation de tout l'outil de production. Dans le cas d'une impression en très grand volume elle ne pose cependant pas de problèmes majeurs.

V.3.b Principaux résultats des essais industriels

Le comportement électromagnétique de ces essais sera analysé dans la section VI.3.b mais certaines conclusions peuvent déjà être tirées.

Concernant le phénomène de halo, comme nous l'avons vu sur la figure 86 et la figure 87, un anilox plus petit et une pression plus importante permettent de transférer plus d'encre dans la partie utile du motif. Ce constat n'a été fait qu'après les essais industriels et, à cette voie d'amélioration, a été préférée à ce moment là une augmentation de la taille de l'anilox. En effet, les premiers essais présentés en VI.3.a montraient une augmentation de l'efficacité lorsqu'on augmentait la taille de l'anilox. Or, un gros anilox de 30cm³/m² induit un élargissement du motif, quelle que soit la pression mise en jeu et, s'il n'est pas contrôlé, il peut aller jusqu'à provoquer des interconnexions entre motifs. Nous avons rencontré ce type de problème sur toute la production industrielle avec cet anilox. Ces interconnexions, schématisées à la figure 93, se produisent de façon aléatoire. Il est donc difficile d'en prédire l'impact sur le fonctionnement électromagnétique. Nous verrons dans la section VI.3.b que le fonctionnement est complètement perturbé.

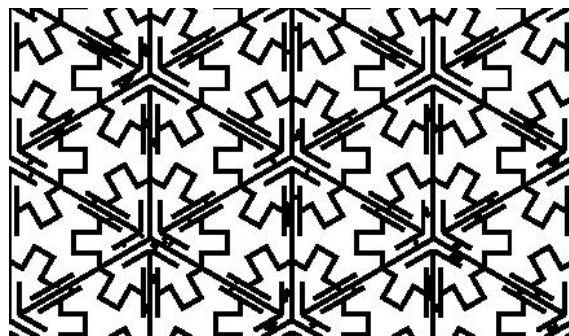


Figure 93 : Exemple d'interconnexions entre motifs pour un anilox de 30cm³/m².

Concernant l'impression sur la face non couchée du papier avec un anilox de $30\text{cm}^3/\text{m}^2$, le nombre d'interconnexions est encore plus important car l'encre a tendance à s'agglomérer le long des fibres de papier très présentes en surface comme le montre la figure 94.

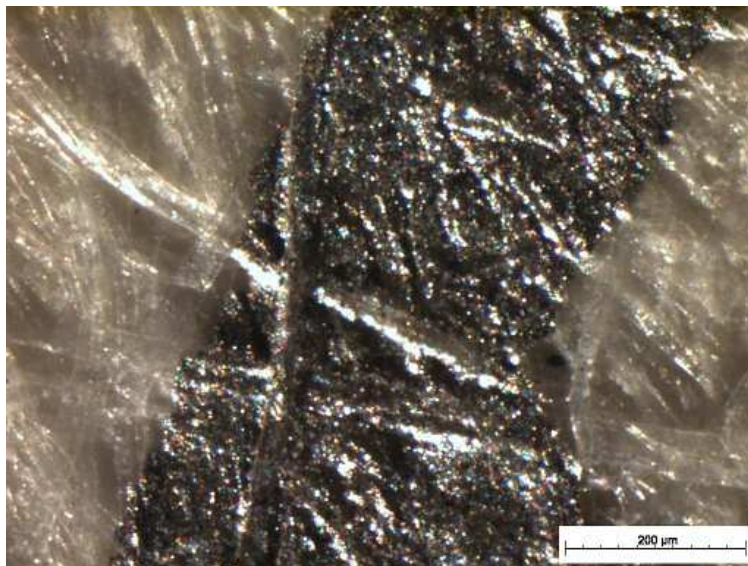


Figure 94 : Photographie d'une impression sur la face non couchée d'un papier avec un anilox de $30\text{cm}^3/\text{m}^2$.

Pour l'impression en deux passes, censée limiter l'élargissement du motif et le phénomène de halo, là encore un problème important peut être décelé à l'œil. En effet, comme le montre la figure 95, un décalage se produit entre les deux passes d'impression. Ce décalage, de $500\mu\text{m}$ environ, est suffisamment important pour provoquer de nombreuses interconnexions qui perturbent le comportement électromagnétique.



Figure 95 : Photographie d'une impression en deux passes où un décalage existe.

Au final, sur les quatre essais d'impression industrielle, seul celui avec un anilox de $13\text{cm}^3/\text{m}^2$ correspond à nos attentes en termes de qualité d'impression. De même, dans le rouleau d'impression en deux passes, une partie du rouleau a été imprimée uniquement avec un anilox de $16\text{cm}^3/\text{m}^2$, et est donc exploitable. Quoiqu'il en soit, des mesures ont été faites sur tous les échantillons afin de confirmer les performances.

V.4 Conclusions et perspectives

L'ensemble de ces travaux a donc conduit à plusieurs séries d'impression avec des objectifs différents à chaque fois.

La première a été réalisée sur le pilote d'impression flexographique du CTP avec le cliché présenté à la figure 82. Elle a eu pour but de mieux appréhender les performances que l'on pourrait atteindre pour l'impression de nos motifs et de savoir sur quels paramètres il faut jouer pour améliorer l'impression, donc l'efficacité du filtrage. Cette série a été réalisée durant un stage et a permis de conclure que l'impression de motifs était réalisable et que le facteur prédominant sur l'efficacité était la taille de l'anilox.

Une deuxième série d'impression, toujours réalisée sur l'I-speed Flex, a utilisé le cliché présenté à la figure 83. Ceci afin d'obtenir des bandelettes qui ont permis de tester l'efficacité réelle des motifs sur papier. Durant cette série d'impression, différentes tailles d'anilox ont été testées et ce sur les deux références adéquates de papier, Kaemplex LW2 et 3.

Ensuite, grâce aux résultats obtenus par la série d'essais précédents, il a été décidé de réaliser des essais industriels. Chacun ayant pour but de démontrer la faisabilité d'une impression particulière. A la suite de ces derniers essais, une limitation concernant la taille de l'anilox a été rencontrée : le phénomène de halo. Une dernière série d'impressions en laboratoire a donc été lancée pour connaître les paramètres optimums concernant ce phénomène. Ainsi, trois séries d'impressions papier conviennent aux mesures électromagnétiques.

VI Métapapier : conditions réelles et effets

VI.1 Introduction

Dans une première partie, pour s'assurer qu'il n'y ait pas de limitations dues à l'utilisation de bandelettes au format 8 cm x 20 cm assemblées les unes aux autres à la place d'un échantillon complet, nous utilisons des bandelettes d'époxy. Nous testons ainsi différents positionnement et différentes tailles d'adaptateur afin de garantir que la mesure soit le moins possible influencée par le format des échantillons.

Dans une deuxième partie, nous abordons l'utilisation de papier à la place d'époxy. N'ayant pu appréhender les effets d'autres défauts, inhérents à l'utilisation de bandelettes de papier imprimées en laboratoire, nous les expliciterons et tenterons d'en estimer les répercussions sur les performances des papiers imprimés. Nous utilisons ensuite les échantillons de papier produits au CTP pour vérifier leur efficacité de filtrage en fonction des principaux paramètres d'impression. Nous présentons ici le résultat de ces optimisations du point de vue de la mesure de l'efficacité de filtrage. Nous présentons aussi dans cette partie les mesures d'efficacité de filtrage des essais industriels réalisés. Enfin, à l'aide de ces essais, nous confirmons que l'utilisation de bandelettes, au lieu d'échantillons complets, n'a causé aucune dégradation de l'efficacité de filtrage.

Dans une troisième partie, à l'aide des bandelettes de papier, nous présentons les mesures de l'utilisation standard d'un papier-peint. Nous verrons ainsi l'effet d'une plaque de plâtre, d'une plaque de bois, de la colle à tapisserie, d'un papier-peint décoratif ou d'une seconde couche du métapapier en superstrat. Ces essais ont été faits avec des produits sélectionnés par un de nos partenaires industriels et représentent l'ensemble des possibilités du marché.

Dans une quatrième partie, nous présentons les résultats obtenus après l'installation de métapapier dans une pièce de démonstration de quelques mètres carrés.

Enfin, dans la dernière partie, nous abordons très brièvement l'effet de la mise en application dans des conditions réelles.

VI.2 Utilisation de bandelettes d'époxy au lieu d'un échantillon complet

VI.2.a Introduction

Les premiers échantillons que nous testons sont ceux fabriqués avec l'appareil flexographique du CTP. Pour rappel, la taille des surfaces utiles produites avec cette machine est de 8 cm x 20 cm. Cette surface est trop petite pour être testée directement. Il faut donc assembler plusieurs bandelettes. La question qui se pose alors porte sur l'effet de cet assemblage. C'est le sujet de cette section.

VI.2.b Présentation des situations à examiner

Pour tester l'effet de l'assemblage, nous avons fait fabriquer des échantillons sur FR4 de 0.2mm d'épaisseur. Le motif utilisé est celui de la figure 83, utilisé pour la réalisation de bandelettes de papier. La taille utile des échantillons d'époxy est donc la même que celles des bandelettes de papier, soit 8 cm x 20 cm.

Nous disposons d'un banc dont l'ouverture est soit de 50 cm x 50 cm, soit de la taille d'une feuille A3 (29,7 cm x 42 cm) ou A4 (21 cm x 29,7 cm). Cela nous a conduit à assembler 8 bandelettes de papier pour former un échantillon, comme le montre la figure 96.

Le design d'une bandelette comprend un nombre entier de cellule élémentaire et permet, lors de l'assemblage, d'obtenir un échantillon complet ne présentant aucune rupture visuelle dans la répétition des motifs bien qu'une coupure électrique existe. La découpe des bandelettes d'époxy a été faite à l'aide de machine numérique et est donc de très bonne qualité. De cette façon l'assemblage peut être considéré comme parfait.

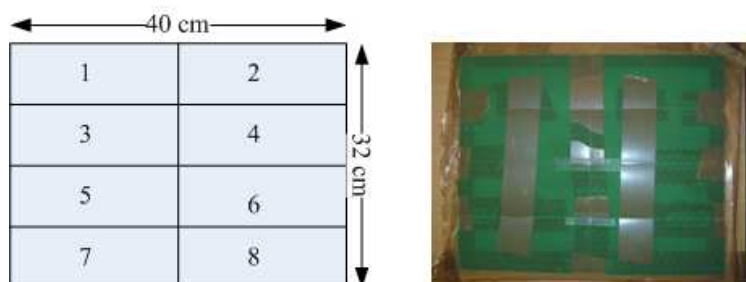


Figure 96 : Schéma et photographie de l'assemblage des 8 bandelettes d'époxy.

La figure 96 montre également l'assemblage final des huit bandelettes à l'aide de scotch. Le résultat est un échantillon de 32 par 40cm fixé, à l'aide de scotch, sur le banc de test. Les dimensions du motif utilisé sont celles présentées dans le tableau 25.

Tableau 25 : Valeurs des paramètres des motifs de SSF utilisés. Les paramètres sont définis à la figure 46.

Paramètre	A	B	C	D	E	F	G	H
Dimension (mm)	10.9	4	0.57	3.375	0.25	2.2	3.52	2

Plusieurs possibilités s'offrent à nous pour centrer l'échantillon sur le panneau. En effet, pour une ouverture A3, seule une bande de 2 cm restera vide. Nous avons fait un essai avec l'espace libre et un autre en recouvrant l'espace d'une tôle d'aluminium. Pour une ouverture A4, deux possibilités existent. L'échantillon peut être orienté horizontalement ou verticalement ce qui provoque, outre un changement de polarisation perçue, une différence dans le nombre et la position des coupures présentes dans la partie testée de l'échantillon. Enfin, toujours dans le cas d'un adaptateur A4, pour un positionnement horizontal ou vertical, l'échantillon peut être déplacé de telle sorte que, le nombre et la taille des coupures présentes dans la partie de l'échantillon testé changent. Au final 4 essais dont le positionnement est représenté à la figure 97 :

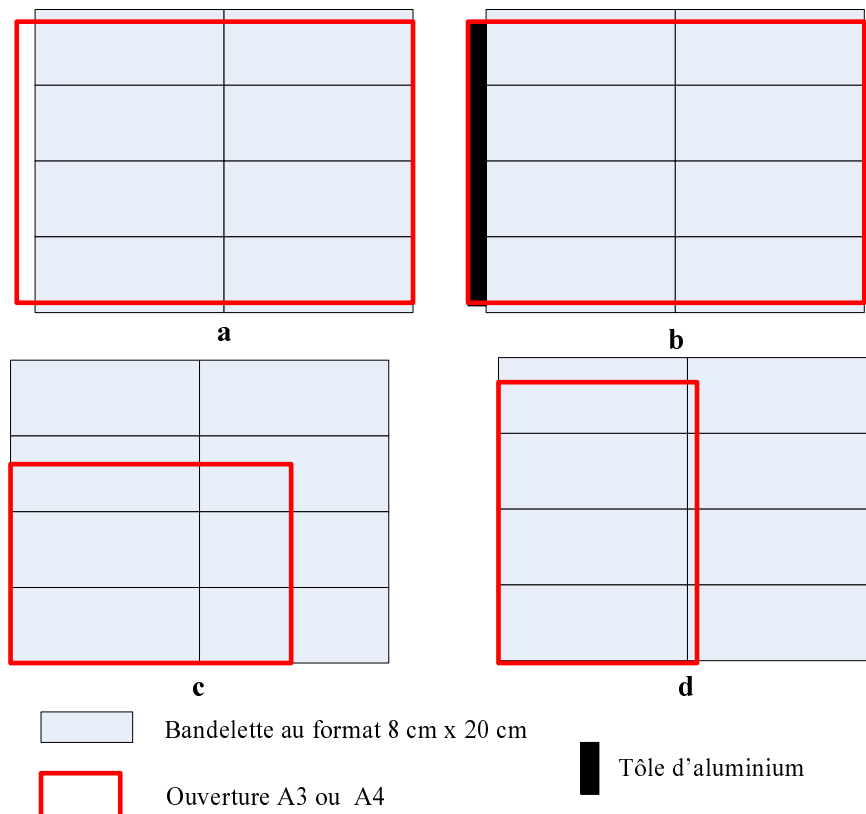


Figure 97 : Représentation schématique des 4 configurations testées.

- échantillon avec un adaptateur A3 (figure 97a) ;
- échantillon avec un adaptateur A3 réduit (figure 97b) ;
- échantillon à l'horizontale, un minimum de coupures visibles avec un adaptateur A4 (figure 97c) ;
- échantillon à la verticale, un minimum de coupures visibles avec un adaptateur A4 (figure 97d).

Nous cherchons à vérifier que le fonctionnement de notre échantillon, fabriqué à l'aide de bandelettes, a les mêmes performances qu'un échantillon complet. Pour cela, nous allons comparer chacune des situations exposées précédemment à la mesure de l'échantillon d'époxy WiFi, présenté en IV.4.av. Afin de faciliter la comparaison, l'ensemble des mesures sera filtré.

VI.2.c Avec un adaptateur A3

Dans un premier temps, nous cherchons à voir si l'utilisation d'un adaptateur A3, laissant donc apparaître une bande vide de 2 cm (figure 97a), pose souci. Le but est de maximiser le niveau d'atténuation atteignable avec les bandelettes pour, si possible, atteindre le niveau d'atténuation de l'échantillon complet. Pour cela, des mesures dans la configuration de la figure 97a et b sont réalisées. Elles sont comparées à la mesure d'un échantillon complet, dont les caractéristiques sont données dans le tableau 19, associé à un adaptateur A3. Rappelons que l'épaisseur du substrat de cet échantillon est de 1.6mm comparée à 0.2mm pour les bandelettes.

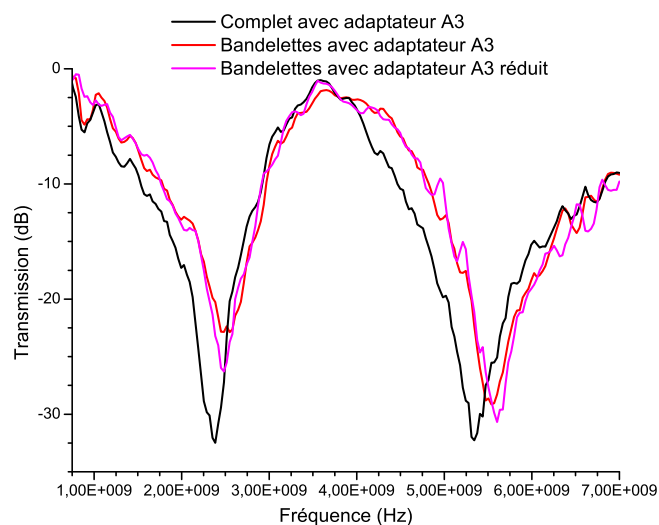


Figure 98 : Comparaison entre une mesure d'un échantillon complet avec un adaptateur A3 et 8 bandelettes d'époxy sur un adaptateur A3 normal ou réduit.

Les résultats de mesures sont présentés à la figure 98. Toutes ont été réalisées pour une polarisation TE. On observe que l'atténuation atteinte avec un échantillon complet est supérieure d'environ 10dB pour la fréquence basse et de 5dB pour la fréquence haute, à ce qui est atteint avec un échantillon en bandelettes.

Deux explications sont possibles. La première serait de dire que l'ouverture entre l'adaptateur et l'échantillon provoque ce comportement. L'effet de l'ouverture devrait être plus important en haute fréquence qu'en basse fréquence étant donné ses dimensions cependant, comme cet effet est complété par une diffraction importante nous ne pouvons le certifier. De plus, lorsque le vide est caché à l'aide d'une surface métallique (figure 97b), malgré une légère réduction de l'écart avec la courbe noire, le problème persiste. La deuxième possibilité est que les coupures entre les bandes sont responsables de la perte d'atténuation. Dans ce cas, comme nous l'expliquerons dans la section suivante, la résonance la plus impactée devrait être la première. Or, c'est bien ce qui se produit ici, d'où le fait que la deuxième explication soit probablement plus réaliste. La seule façon de réduire cet effet serait donc de diminuer le nombre de coupures visibles.

On observe aussi un léger décalage en fréquence entre l'échantillon complet et les bandelettes. Ceci s'explique facilement par la différence d'échantillon (tableau 19 vs tableau 25 et différence d'épaisseur de substrat).

VI.2.d Avec un adaptateur A4

Afin de diminuer le nombre de coupures présentes dans la partie testée de l'échantillon, l'utilisation d'un adaptateur A4 s'impose. Deux configurations peuvent exister : figure 97c et d. Elles permettent toutes deux de minimiser le nombre de coupures visibles au vu de leur positionnement respectif : vertical ou horizontal.

i Echantillon en position verticale

En observant la figure 97c, on voit qu'effectivement moins de coupures sont visibles dans l'ouverture qu'avec un adaptateur A3 et donc que le niveau d'atténuation devrait être meilleur. On voit sur la figure 99 que les niveaux d'atténuation sont plus bas que ceux obtenus avec l'ouverture A3. Un écart de 2.5dB existe pour la première bande de fréquence. Cependant, pour la deuxième bande de fréquence, rien ne semble avoir

changé. Toutefois, le niveau atteint pour cette deuxième bande de fréquence est quasiment égal à celui mesuré avec un échantillon complet de taille A3 ou A4, soit -30dB. Aucune amélioration ne pouvait donc être attendue.

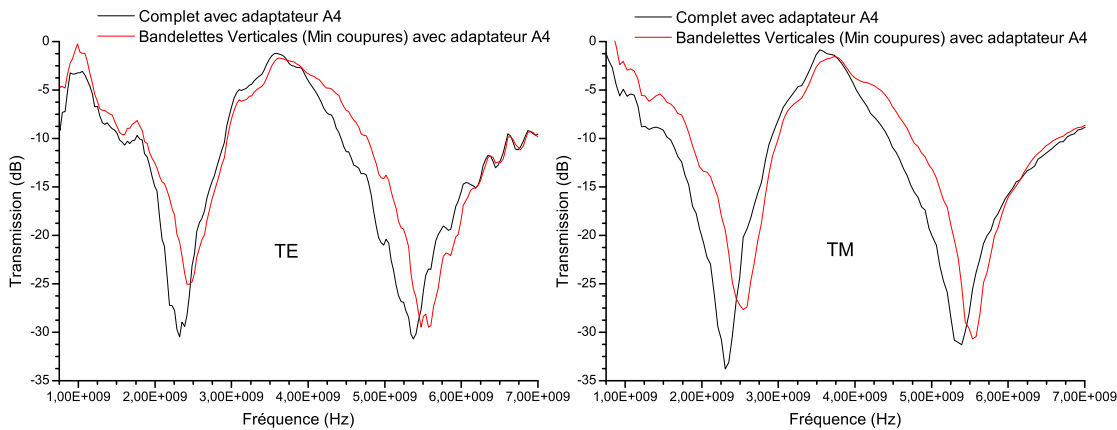


Figure 99 : Comparaison entre une mesure d'un échantillon complet avec un adaptateur A4 et 8 bandelettes d'époxy sur un adaptateur A4 dans le sens vertical.

Le fait que l'atténuation de la première résonance est plus influencée par la présence des découpes s'explique comme suit. La découpe verticale des bandelettes est faite le long du tronc des trepôles, comme le montre la figure 100, au contraire des coupures horizontales, coupant autant les troncs que les branches ou les feuilles de par la répétition des motifs. Les coupures horizontales ne sont pas représentées sur la figure 100 car elles alternent la position de découpe d'un motif à l'autre, comme on peut s'en rendre compte sur le format d'une bandelette présentée figure 83. Ces coupures vont provoquer une rupture de la continuité électrique sur certains motifs. Sur la figure 100, on voit les densités de courant pour la première et la seconde résonance. Pour la première bande de fréquence, les courants de surface sont concentrés dans la première moitié du tronc, tandis que pour la deuxième résonance, ils le sont dans les branches. On comprend alors que la première bande soit plus impactée que la deuxième car, seules deux branches sur six sont impactées par la découpe verticale.

Au final, malgré l'amélioration de l'atténuation, 3 à 5dB manquent encore pour atteindre le niveau d'atténuation d'un échantillon complet. La seule façon de limiter encore plus le nombre de coupure et leur impact est de changer le positionnement de l'échantillon. Nous allons donc le positionner de façon horizontale.

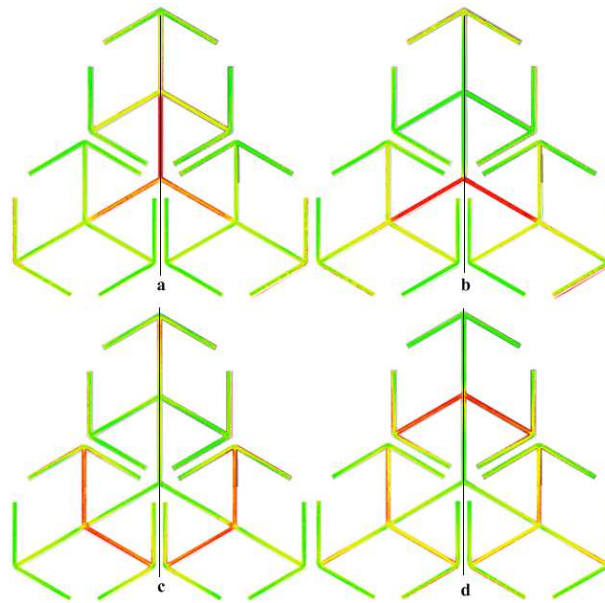


Figure 100 : Courants de surface pour la première résonnance en TE (a), TM (b) et la deuxième en TE (c) et TM (d). Plus la couleur est rouge plus les courants sont importants, plus elle est verte moins ils le sont. En noir la découpe verticale qui sera faite.

ii Echantillon en position horizontale

Le positionnement optimal est celui illustrée figure 97d. On voit que les petites coupures sont toujours visibles, mais elles sont positionnées à quelques millimètres du bord de l'adaptateur A4, ce qui aura ainsi tendance à réduire leur influence.

Les résultats obtenus sont présentés à la figure 101. On constate que pour cette dernière configuration, une grande augmentation de l'atténuation est obtenue : 5dB d'amélioration. On voit aussi que l'atténuation atteint les mêmes niveaux que ceux obtenus avec un échantillon complet comme espéré.

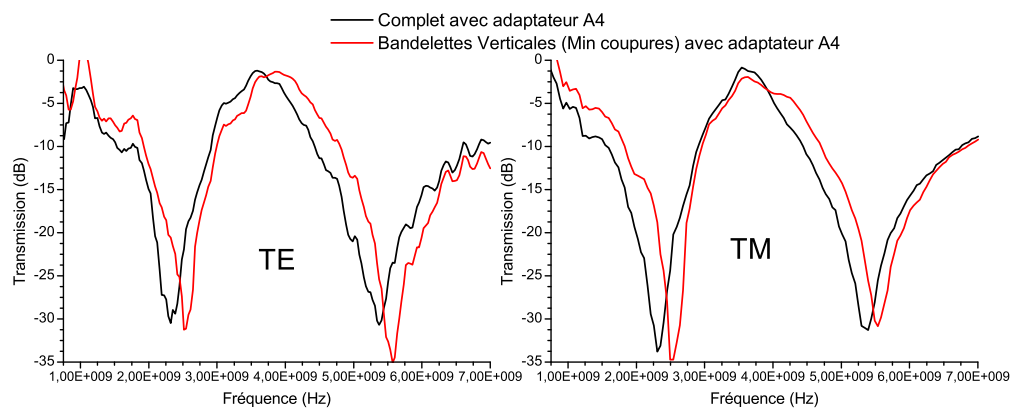


Figure 101 : Comparaison entre une mesure d'un échantillon complet avec un adaptateur A4 et 8 bandelettes d'époxy sur un adaptateur A4 dans le sens horizontal.

VI.2.e Conclusion sur l'utilisation de bandelettes au lieu de substrats complets

Grâce à cette petite étude, nous avons donc pu montrer que l'utilisation de bandelettes à la place de grands échantillons ne posait pas de problèmes si les bandelettes sont assemblées et positionnées correctement. En effet, il apparait que la coupure dans la longueur a un plus fort impact sur la première bande en raison de la répartition des courants de surface, tandis que la coupure dans la largeur a un effet sur les deux bandes. Des mesures complémentaires, effectuées avec du papier et présentées en VI.3.bv, ont d'ailleurs montré que l'amélioration d'atténuation pour un positionnement particulier était bien répétable. Ainsi, les bandelettes de papier produites à moindre coût sur une machine laboratoire, devraient permettre de caractériser correctement le fonctionnement de notre papier-peint. En revanche, certains défauts risquent d'apparaître avec du papier que nous ne pouvons pas tester avec de l'époxy comme une mauvaise découpe ou un mauvais assemblage.

VI.3 Utilisation de papier

Dans un premier temps, au vu des travaux présentés dans la section V, nous pouvons estimer à nouveau les performances escomptées. En effet, nous avons la possibilité d'imprimer en encre conductrice des échantillons sur papier dans des conditions qui vont probablement entrainer une dégradation du fonctionnement souhaité, mais qui permettront d'obtenir des échantillons fonctionnels. En effet, comme le montre le résultat de simulation présenté figure 102 et comme nous l'avons expliqué partie I.2.b, la baisse de la conductivité engendre une baisse de la capacité à réfléchir les ondes et donc de l'efficacité.

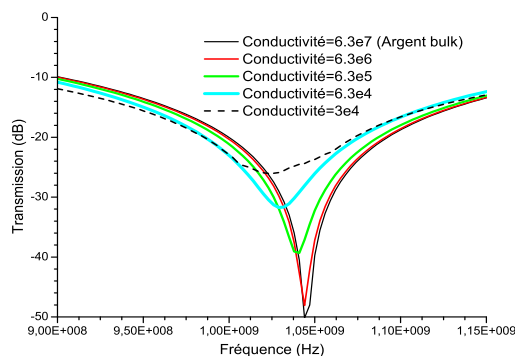


Figure 102 : Simulation d'un tripôle où l'épaisseur vaut à chaque fois l'épaisseur de peau.

Ainsi, étant données nos mesures de conductivité, présentées section V.2.biv, et la figure 102, nous pouvons estimer l'efficacité de filtrage de nos échantillons papiers aux alentours des 25dB. En effet, les simulations de la figure 102 utilisent, dans le pire des cas, une conductivité de 3.10^4S/m correspondant à nos mesures de conductivité. De plus, ces simulations ont été réalisées sans substrat et les pertes dues au papier doivent encore être ajoutées.

Au final, les simulations comparatives affichées dans cette section utiliseront une conductivité de 3.10^4S/m et un substrat avec des pertes à 0.1. Nous verrons que des performances d'environ 22.5dB sont alors attendues.

VI.3.a Premières impressions en laboratoire

i Défauts rencontrés et effets possibles

Nous avons constitué des échantillons en assemblant 8 bandelettes de papier imprimées au CTP. Le motif imprimé est le même que pour les bandelettes d'époxy. Chaque bandelette de 30 cm par 10 cm est coupée individuellement au massicot pour se ramener aux dimensions utiles de 8 cm par 20 cm comme décrit dans la section V.2.ai. Elles sont ensuite assemblées avec du scotch. Un exemple de réalisation est illustré à la figure 103.

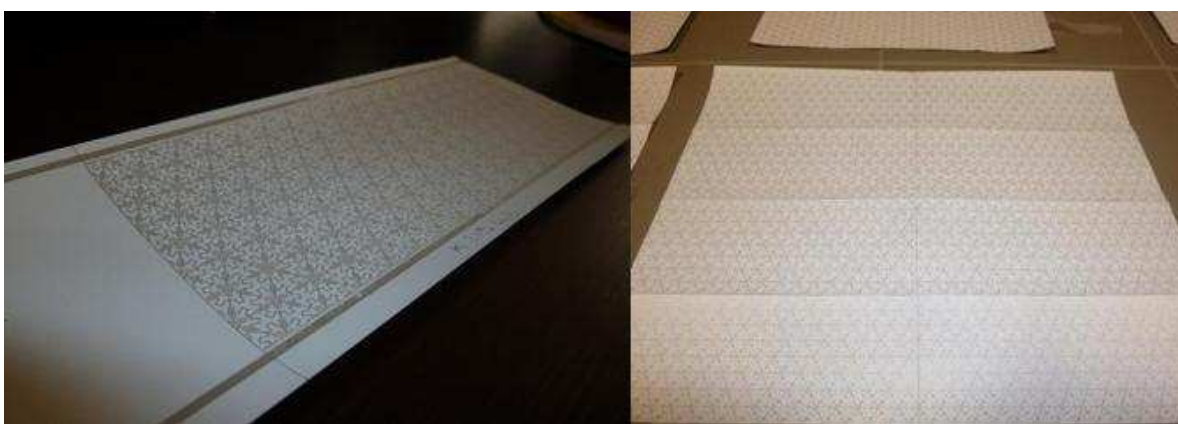


Figure 103 : Photographie d'une bandelette imprimée en laboratoire et de l'assemblage de 8 d'entre elles.

On peut aussi voir figure 104 gauche, un assemblage propre de quatre bandelettes de papier. Sur cette photographie, on discerne bien l'interface horizontale en raison de la courbure des bandelettes qui la fait ressortir mais, il est déjà plus difficile de

discerner l'interface verticale, que ce soit au-dessus ou en-dessous de celle horizontale. Malheureusement, tous les assemblages ne sont pas toujours aussi propres, et la figure 104 droite montre un mauvais assemblage dû à un problème de découpe et de mauvais positionnement. On discerne nettement que la bande du dessus a été trop coupée tandis que celle du dessous ne l'a pas été assez.

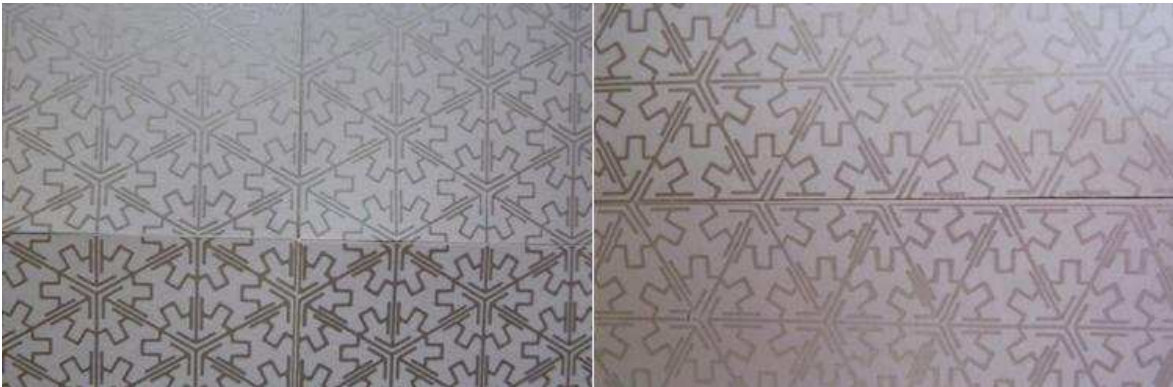


Figure 104 : Photographie d'un assemblage propre ou l'on discerne à peine la frontière entre les quatre bandelettes différentes.

A cela vient s'ajouter un autre problème : celui de l'impression. En effet, le procédé d'impression utilisé passe par trois phases. Une première où l'encre n'est pas encore correctement répartie sur le cylindre d'impression, une deuxième où l'impression est bonne et répétable et enfin, une troisième, dans laquelle les rouleaux ont tendance à être surchargés en encre et ainsi à baver. Tout ceci est fonction de l'anilox utilisé. Il est cependant difficile de séparer les bandelettes selon ces trois catégories. Bien qu'elles nous aient été fournies dans l'ordre d'impression, nous sommes parfois obligés d'en utiliser certaines qui présentent des défauts d'impression.

Certains défauts d'impression peuvent être dus à la présence d'une poussière sur le rouleau encreur et il est difficile de les détecter au cours d'une impression. On retrouve donc parfois de petits défauts d'impression comme sur la figure 105 à gauche.

Un autre type de défaut peut apparaître lorsque la quantité d'encre déposée avec certains anilox est trop faible. Dans ce cas là, on peut voir à l'œil nu que les motifs manquent d'encre et la répercussion sur la mesure risque d'être grande.

Enfin le dernier type de défauts d'impression est dû à la difficulté de régulation de la pression sur la machine d'impression du CTP. En raison de cette difficulté, sur un même lot, la pression peut varier un peu et entraîner une très légère distorsion du motif

dans le sens d'impression, produisant ainsi une bandelette plus ou moins longue. On voit, figure 105 à droite, que même si l'assemblage n'est pas impacté la répétition du motif n'est plus garantie à l'identique. Ce défaut ne devrait cependant pas entraîner de grosses dégradations de la mesure excepté, probablement, une légère perte en atténuation et un élargissement du pic de rejection. Effectivement, si les dimensions du motif sont légèrement modifiées il résonnera à une fréquence très proche de la fréquence attendue produisant ainsi un élargissement du pic d'atténuation au détriment de son maximum.

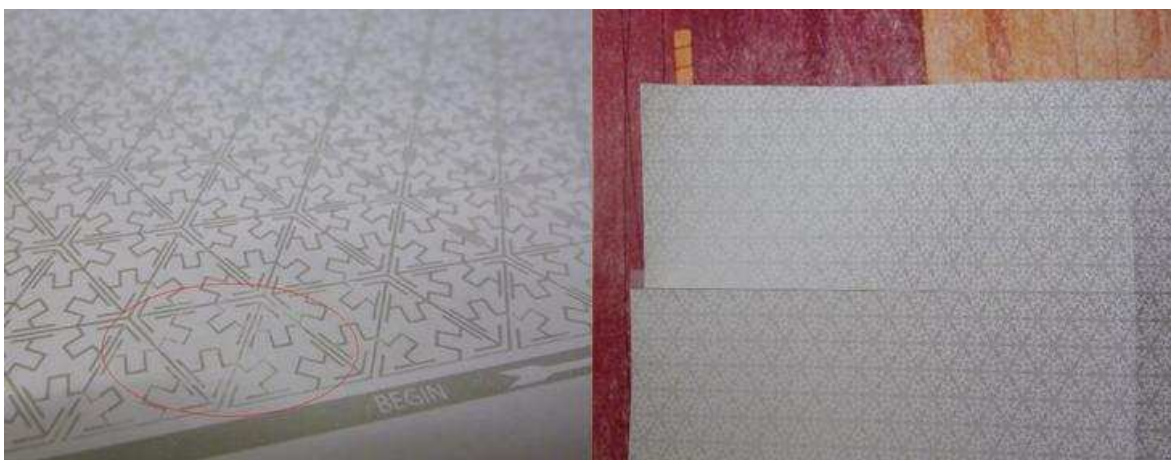


Figure 105 : Photographie de défauts d'impressions (entourés en rouge) à droite et de l'agrandissement d'une impression du à une mauvaise régulation de la pression appliquée durant un même run à gauche.

Pour les tests, nous avons fait en sorte de constituer les échantillons en regroupant les bandelettes avec le moins de défauts ensemble pour former des échantillons de « bonne » qualité et d'autres de moins « bonne » qualité.

ii Mesures en fonction de la taille de l'anilox

Huit échantillons ont été constitués à l'aide d'une première série d'impression laboratoire sur du papier Kaemplex LW2. Bien que, dans cette première série d'impression de SSF, la pression appliquée n'ait pas fait l'objet d'un contrôle strict, elle a été réglée de façon à obtenir une impression qui, visuellement, paraissait correcte : pas de manques ou de bavures flagrants. Cette première série d'impression d'échantillons nous permet d'étudier plus précisément l'impact de la taille de l'anilox sur le comportement électromagnétique. Nous avons vu à la section V.2.b que l'influence de

la taille de l'anilox sur l'épaisseur déposée n'était pas évidente, nous devons vérifier si c'est aussi le cas sur l'efficacité de filtrage.

Pour cela, les anilox de 7, 10, 15, 20 et 25cm³/m² sont utilisés. Deux échantillons ont été constitués pour chaque taille sauf pour les deux plus petites pour lesquelles un seul échantillon a été fabriqué à chaque fois. Sur les échantillons en double, l'un des deux présente à chaque fois plus de défauts que l'autre (que ce soit d'impression, de découpe ou d'assemblage).

On peut observer figure 106 les résultats de mesure pour ces huit échantillons. Sur cette figure on trouve aussi un résultat de simulation effectuée sur un matériau papier : épaisseur 200µm, permittivité 3.2, perte 0,1 et conductivité $3 \times 10^4 S/m$. Tous les résultats sont ici donnés pour une polarisation TE afin de ne pas alourdir l'analyse ou la présentation. Les mesures en TM montrent les mêmes tendances et les mêmes niveaux de performance.

On observe tout d'abord que le fait d'augmenter le volume de l'anilox augmente l'efficacité de filtrage. En effet, on voit que dans le cas où la taille de l'anilox est maximale, la figure d'atténuation se rapproche de celle prédite en simulation. La différence des fréquences atténuées est due à une différence entre la valeur réelle de la permittivité du papier et celle utilisée pour les simulations.

Pour le meilleur essai, la différence en atténuation est inexistante sur la deuxième bande et n'est que de 3 à 4dB pour la première. Cette différence entre les bandes de fréquence rejetées s'explique par la présence des coupures qui, comme cela a été dit, provoquent un effet plus important sur la bande basse. En effet, bien que le positionnement optimal soit respecté, cette fois-ci l'ensemble des coupures est imparfait et les effets s'en font donc malgré tout ressentir, provoquant ainsi ce déséquilibre. Le très bon accord sur les niveaux d'atténuation entre simulations et mesures tendrait à montrer que la conductivité utilisée est bien la bonne. Il y a donc matière à amélioration en augmentant cette dernière.

On observe aussi une atténuation inexistante ou très faible pour les deux plus petits volumes d'anilox. En effet, pour l'anilox de 7cm³/m², aucun effet n'est ressenti. Le film déposé ne doit donc pas fournir de continuité électrique le long du motif. Pour l'anilox de 10cm³/m², bien que des effets commencent à apparaître, le comportement

sélectif ne se met pas en place, là encore probablement à cause d'une discontinuité électrique le long des motifs.

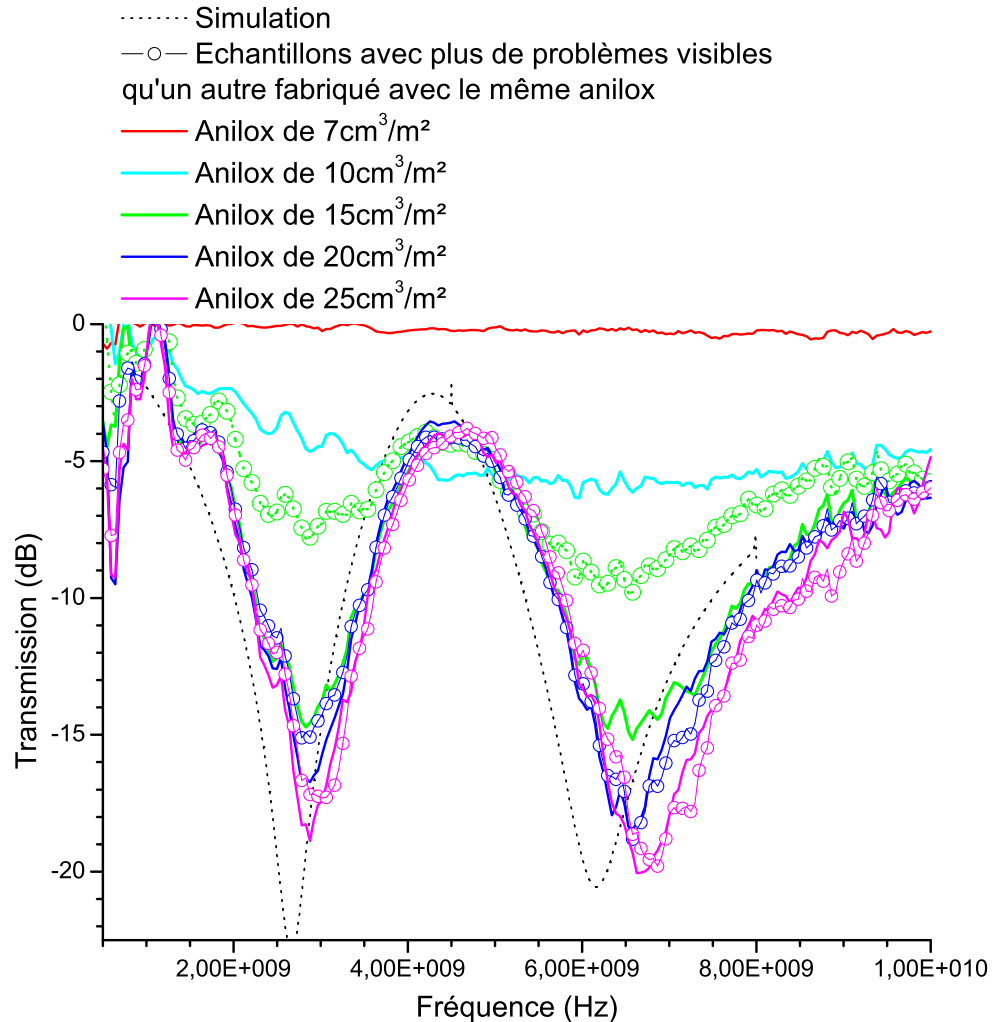


Figure 106 : Mesures de l'efficacité de filtrage en fonction de la taille de l'anilox.

De plus, on voit qu'avec un anilox de $15\text{cm}^3/\text{m}^2$, la présence de défauts fait perdre énormément en efficacité : 5 à 8dB tandis qu'avec un anilox de $20\text{cm}^3/\text{m}^2$ la perte n'est que de 2dB et d'1dB avec un anilox de $25\text{cm}^3/\text{m}^2$. Il semble donc qu'augmenter la taille de l'anilox au-delà de $15\text{cm}^3/\text{m}^2$, empêche les échantillons d'être sensibles aux manquements d'encre responsables des chutes d'atténuation supérieures à 5dB. Les pertes d'atténuation sur les anilox de taille supérieure sont probablement dues aux coupures et à l'assemblage, comme semble le confirmer le fait qu'il y ait une légère différence de perte d'atténuation entre les deux bandes de fréquence.

Quoiqu'il en soit, les 20dB espérés sont quasiment atteints et une impression industrielle devrait permettre de résoudre certains problèmes. En effet, l'utilisation

d'une laize de 26.5cm permettra d'éliminer les problèmes de découpe et d'assemblage. De plus, la continuité du procédé alliée à une meilleure maîtrise de la pression appliquée permettra de grandement diminuer les défauts d'impressions.

iii Mesures en fonction de la pression appliquée

Une dernière série d'impression laboratoire a été réalisée. Ceci afin de confirmer ou d'infirmer certaines suppositions comme l'effet de la pression appliquée ou l'espacement minimal entre deux motifs lorsqu'un halo conséquent apparaît. Le procédé de fabrication du CTP ne permettant pas de contrôler précisément la pression, seuls deux échantillons seront fabriqués avec un anilox de $20\text{cm}^3/\text{m}^2$. L'un avec une pression minimale et l'autre avec une pression maximale. Dans les deux cas, les échantillons sont préparés avec grand soin afin qu'ils soient comparables en termes de défauts d'impression, de découpe ou d'assemblage. La mesure de ces deux échantillons est donnée à la figure 107.

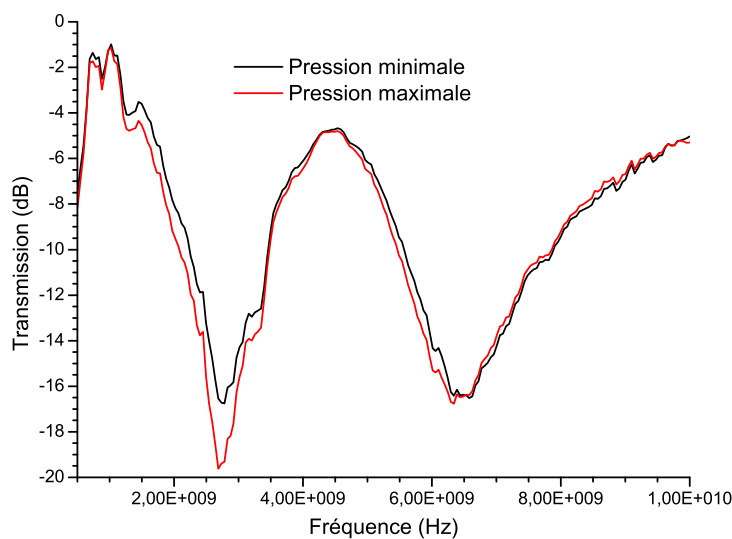


Figure 107 : Mesures de l'efficacité de filtrage d'échantillons fabriqués avec un anilox de $20\text{cm}^3/\text{m}^2$ en fonction de la pression appliquée.

On voit que lorsque la pression appliquée augmente, l'efficacité de filtrage augmente mais, uniquement pour la première bande. Nous supposons que la raison à cela est que la distribution de l'encre s'améliore mais pas de façon uniforme dans tout le motif. Il est possible que cela soit le cas uniquement dans le sens d'impression qui est la direction du tronc des trepôles, responsable de la première résonance. Les branches du trepôle sont dans le sens perpendiculaire à la direction de l'impression, ce qui

produit un effet différent sur la répartition de l'encre dans ces zones. Ces suppositions n'ont pas pu être confirmées à l'aide du TOPO3D qui n'a détecté aucune différence conséquente entre ces deux parties du motif pour justifier de ce phénomène. Il faut cependant rappeler que le TOPO3D ne peut détecter que l'encre en surface du papier. Or, lorsque la pression augmente, la hauteur d'encre sous le niveau du papier s'accroît, et les différences pourraient être à ce niveau là.

VI.3.b Impression industrielle

Comme nous avons expliqué à la section V.3, seul un des quatre essais réalisés présente, a priori, la qualité conforme à nos attentes en termes de figure de filtrage. Dans tous les autres cas, l'impression présente des défauts résultant en une continuité électrique entre chaque motif. Pour chaque mesure, deux échantillons prélevés à des endroits différents de la bobine ont été utilisés. Seules les mesures en TE sont affichées car les mesures en TM sont identiques. Pour rappel toutes les mesures sur papier sont filtrées.

i Essai avec impression en deux passes

Nous commencerons par présenter la mesure de l'efficacité de filtrage d'un échantillon imprimé en deux passes. Cet essai avait pour but, tout en limitant l'élargissement du motif et le phénomène de halo, d'imprimer avec l'équivalent d'un anilox de taille plus importante que ceux de l'appareil du CTP. Cependant, comme nous l'avons expliqué à la section V.3, un décalage de 500 μ m entre la première et la deuxième passe existe (voir la figure 95).

Malgré tout, la mesure d'un échantillon de cet essai demeure intéressante car elle permet de mesurer le niveau d'atténuation maximale atteignable avec l'encre utilisée. La figure que l'on doit obtenir, étant donné que l'ensemble des motifs sont joints ce qui forme l'équivalent d'une grille, s'apparente à celle d'un filtre passe-haut.

On voit sur la figure 108 que le comportement des échantillons de 1 jusqu'à 10GHz correspond bien à un filtre passe-haut. Pour les fréquences inférieures, la limitation de dynamique du banc ainsi que le mauvais fonctionnement des antennes en dessous des 750MHz empêchent toute mesure.

L'information intéressante sur ce graphique est la valeur maximale d'atténuation qui est de 25dB. Cela tendrait à prouver qu'une amélioration, par rapport aux 20dB obtenus en laboratoire reste possible avec l'encre utilisée. Quoiqu'il en soit, le fonctionnement obtenu n'est pas du tout celui désiré comme on pouvait s'y attendre.

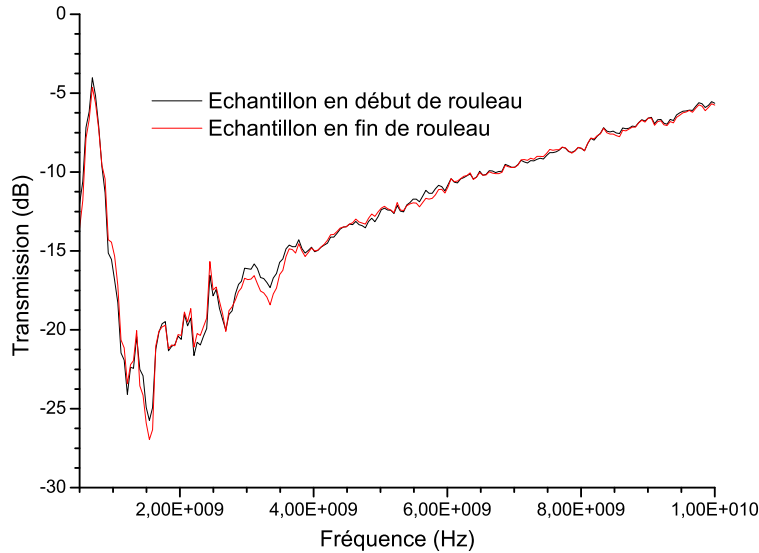


Figure 108 : Mesure de l'efficacité de filtrage d'une impression industrielle effectuée en deux passes

ii Essai avec anilox 30cm³/m² sur la face couchée

Une impression avec un anilox de 30cm³/m² a été effectuée. Cette impression ne présente pas de défauts majeurs visibles à l'œil nu mais, comme le montre la figure 93, de nombreuses interconnexions entre motifs existent de façon aléatoire. Elles sont suffisamment fines pour ne pas être visibles sans un examen approfondi. L'écartement de 250µm entre motifs n'a donc pas suffi au regard de l'élargissement que le motif a subi avec cette taille d'anilox. Ce n'est malheureusement qu'au moment de la mesure de l'efficacité de filtrage, que nous nous sommes rendus compte de ce problème.

On voit sur la figure 109, courbes noire et rouge, que deux effets se superposent. Celui escompté, qui filtre les bandes de fréquence visées, et celui d'un filtre passe-haut qui atténue les basses fréquences. Dans les deux cas, l'efficacité est moindre car l'atténuation ne dépasse jamais 14dB. Tout ceci s'explique par les interconnexions entre motifs car, comme elles sont aléatoires, certains motifs sont indépendants les uns des autres tandis que d'autres sont joints les uns aux autres. Ainsi, une partie des motifs imprimés agit comme nous le souhaitons, tandis qu'une autre agit comme un filtre

passé-haut. Il en résulte une mesure sur laquelle les deux comportements sont visibles mais qui présentent tous deux des performances moindres.

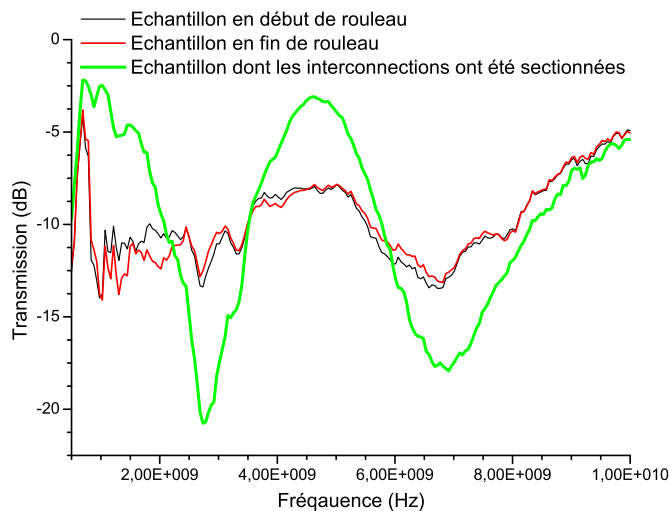


Figure 109 : Mesure de l'efficacité de filtrage d'une impression industrielle réalisée sur la face couchée avec un anilox de 30cm³/m².

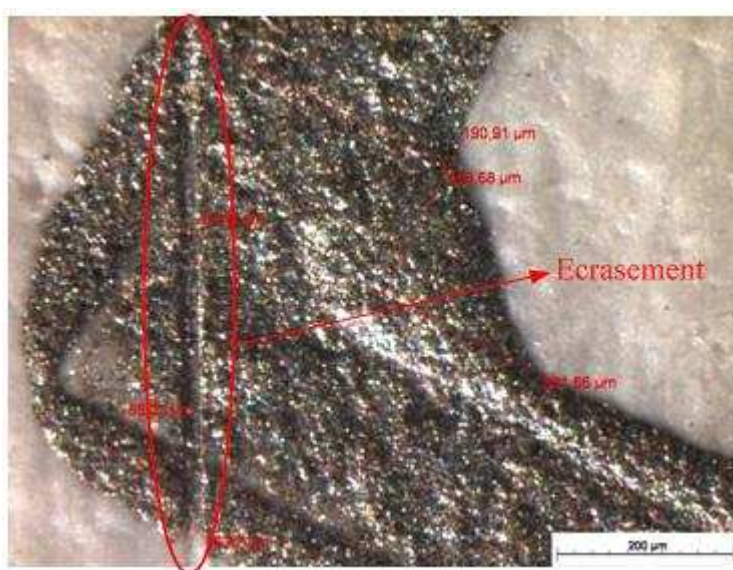


Figure 110 : Photographie d'un des nombreux écrasements présents sur l'essai réalisé avec un anilox de 30cm³/m².

Un autre défaut est présent sur cet essai (et uniquement sur cet essai) et pourrait être responsable d'une partie des problèmes rencontrés. Il s'agit d'écrasements d'une profondeur de 4µm et de largeur 10 à 15µm environ qui se produisent irrégulièrement à quelques millimètres d'intervalle, comme on peut le voir sur la figure 110. Ces écrasements vont jusqu'à provoquer parfois une rupture de continuité électrique qui pourrait réduire l'efficacité des échantillons.

Pour faire la distinction entre les deux effets, nous avons sectionné toutes les interconnexions électriques, une à une. Ce travail permet aussi, si le problème des interconnexions est prépondérant, de visualiser les performances d'une impression maîtrisée avec un anilox de $30\text{cm}^3/\text{m}^2$.

On observe sur la courbe verte de la figure 109, une fois les interconnexions sectionnées, un fonctionnement normal. Nous décrivons en détails les performances obtenues avec cet échantillon retouché dans la section VI.3.biv. Il convient néanmoins de préciser que l'ensemble des interconnexions n'a pas forcément été testé et que certaines peuvent persister.

iii Essai avec anilox $30\text{cm}^3/\text{m}^2$ sur la face non couchée

Pour cet essai, les mêmes problèmes qu'avec le précédent échantillon surviennent, comme on peut le voir figure 111, courbes rouge et noire. En revanche, comme le nombre d'interconnexions est plus important pour les raisons décrites à la section V.3.b, le phénomène passe-haut est renforcé au détriment de celui désiré. Malgré cela, l'atténuation tombe rapidement à 10dB seulement. On peut donc avancer que l'impression sur la face non couchée risque de diminuer les performances, probablement en raison de l'absorption dans le papier d'une partie de l'encre. Pour s'en assurer, nous avons sectionné les interconnexions entre motifs et ainsi supprimé l'atténuation due à l'effet passe-haut. On observe alors sur la courbe verte que les basses fréquences ne sont plus atténuées. En revanche, contrairement à l'impression sur la face couchée, les performances ne sont pas celles attendues et l'atténuation n'est que de 8dB aux fréquences souhaitées. Comme les interconnexions ont pu être mal sectionnées, une dernière vérification s'impose.

Pour confirmer ce point, une mesure à l'aide du *TOPO3D* est effectuée, voir la figure 112. Le résultat montre bien la difficulté à former un film continu. En effet, sur la photographie en couleur, on distingue à peine le motif en Y imprimé. En revanche, on distingue très bien la présence de nombreuses fibres. Ces dernières peuvent d'ailleurs être responsables des variations de hauteur mesurées plus importantes que les 4 à $5\mu\text{m}$ d'encre déposée. Sur la mesure de la hauteur le long de la coupe A-A, on voit des variations pouvant aller jusqu'à $25\mu\text{m}$. Le couchage du papier est donc nécessaire et les motifs ne pourront être imprimés que sur une surface ayant subi ce traitement.

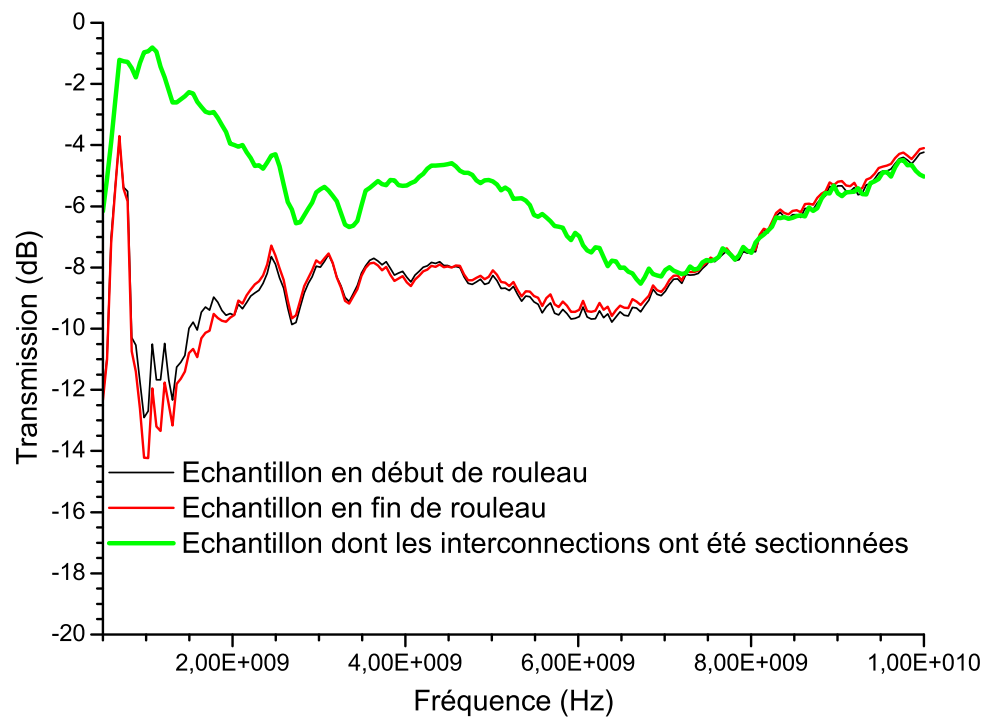


Figure 111 : Mesure de l'efficacité de filtrage d'une impression industrielle réalisée sur la face non couchée d'un papier avec un anilox de $30\text{cm}^3/\text{m}^2$.

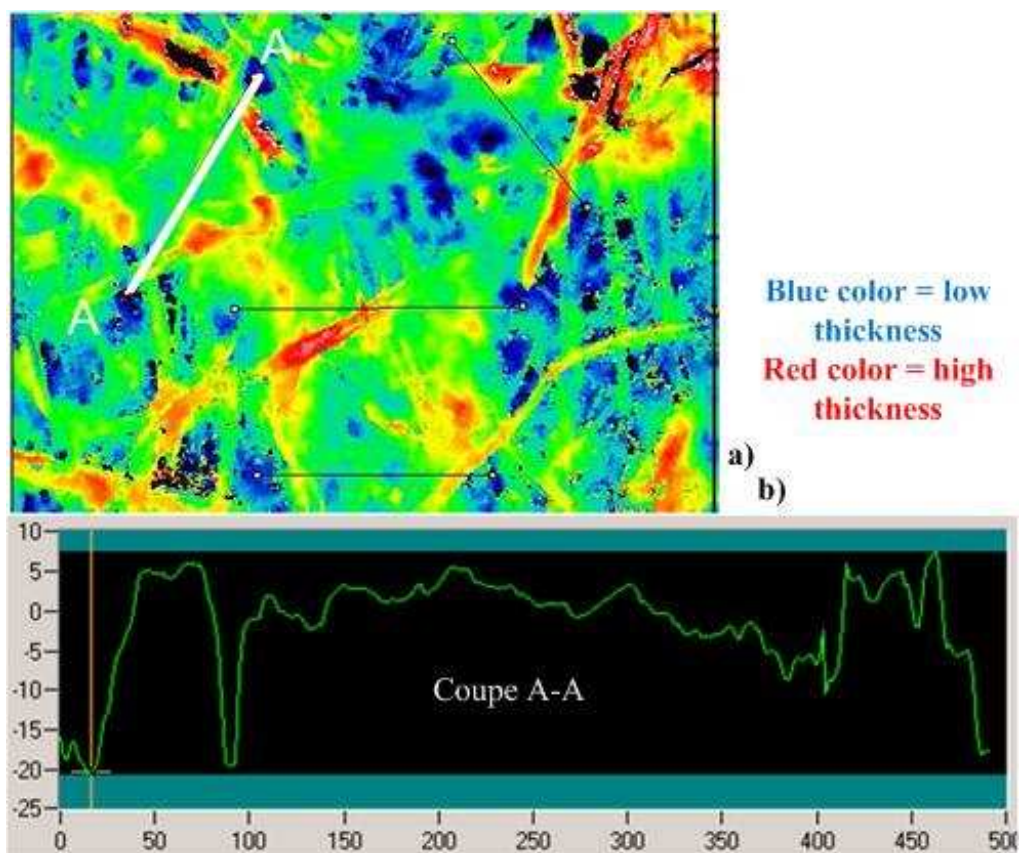


Figure 112 : Mesure de la hauteur faite avec le Topo3D sur la face non couchée d'un papier. La forme est un Y. a) Photo couleur de la hauteur, b) variations de hauteur le long du segment rectiligne AA.

iv Essais avec anilox de 13 et de 16cm³/m²

Les derniers essais à interpréter sont ceux sans défauts, réalisés avec l'anilox de 13cm³/m² et, comme cela a été expliqué à la section V.3, un morceau d'impression avec un anilox de 16cm³/m² est aussi utilisé. Malheureusement, il n'y a de quoi faire qu'un seul échantillon avec ce volume d'anilox. Un troisième échantillon est incorporé dans cette comparaison. Il s'agit de celui fabriqué avec un anilox de 30cm³/m² et dont les intersections entre motifs ont été sectionnées. Là aussi, un seul échantillon a subi ce traitement. Pour mieux nous rendre compte de l'évolution apportée par l'utilisation d'un procédé industriel par rapport aux essais réalisés au CTP, nous comparons la mesure de l'efficacité de filtrage de ces trois échantillons au meilleur essai obtenu au CTP et à la simulation. Ces cinq courbes sont affichées à la figure 113.

Concernant la première bande de fréquence, une atténuation supérieure à 20dB est observée pour ces nouveaux échantillons. Ceci permet d'être très proche des prédictions faites à l'aide des simulations.

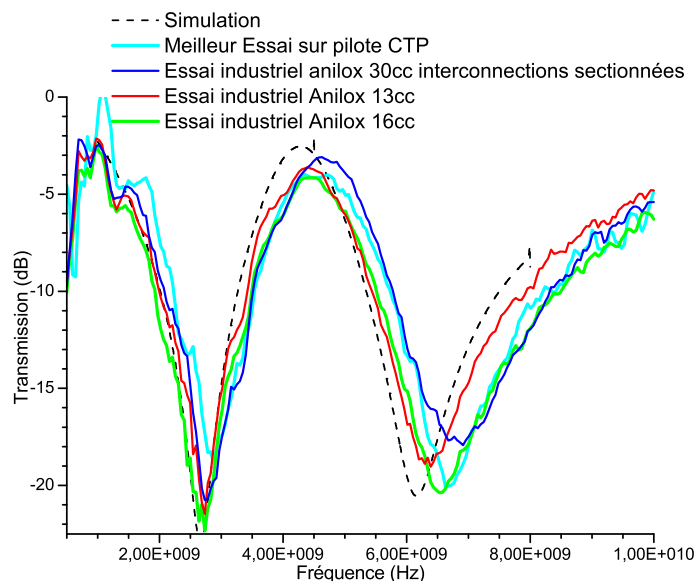


Figure 113 : Comparaison des essais industriels avec un anilox de 13cm³/m² et de 16cm³/m² avec le meilleur résultat obtenu des essais au CTP et à la simulation.

Etant donné les résultats obtenus au CTP, nous nous attendions à ce que la deuxième bande de fréquence ne subisse aucune modification. En effet, elle avait déjà atteint le plafond fixé par la simulation. C'est effectivement ce qui se passe avec un anilox de 16cm³/m². En revanche, pour un anilox de 30 ou de 13cm³/m², on observe une détérioration de 1 à 2dB. Pour l'anilox de 30 cm³/m², l'explication peut être que

l'échantillon a subi de nombreuses altérations durant la découpe des interconnexions et le problème des écrasements est présent. En revanche, pour l'anilox de $13\text{cm}^3/\text{m}^2$, l'effet obtenu est le même sur un échantillon pris en début de bobine qu'en fin de bobine. Nous supposons que l'explication est un léger manque d'encre dans certaines parties du motif qui réduit l'efficacité de la résonance associée. On distingue en effet sur la figure 114 qu'avec un anilox de $16\text{cm}^3/\text{m}^2$, la ligne d'encre est mieux « remplie » qu'avec un anilox de $13\text{cm}^3/\text{m}^2$. Ce constat est d'ailleurs confirmé par une mesure au TOPO3D, figure 116, où l'on voit que pour le plus petit anilox, la hauteur d'encre est estimée entre 1 et $2\mu\text{m}$. Pour l'anilox de $16\text{cm}^3/\text{m}^2$, on estime cette hauteur entre 3.5 et $5.5\mu\text{m}$. Ce constat a été confirmé par plusieurs séries de mesures.

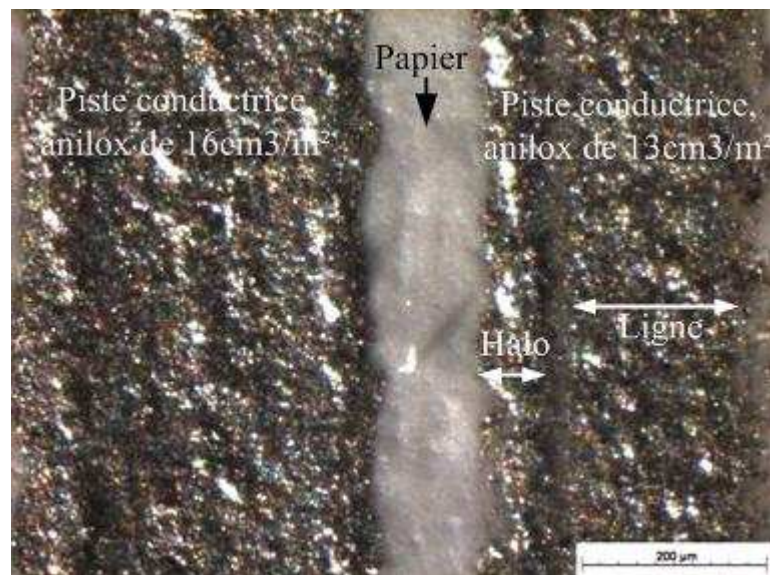


Figure 114 : Photographie d'une impression en deux passes : $16\text{cm}^3/\text{m}^2$ et $13\text{cm}^3/\text{m}^2$.



Figure 115 : Photographie d'un angle droit imprimé avec un anilox de $13\text{cm}^3/\text{m}^2$ à gauche et avec un anilox de $16\text{cm}^3/\text{m}^2$ à droite.

La différence que l'on observe à l'œil nu entre les deux lignes de la figure 114 est en réalité principalement due au fait que ce sont les parties entre le halo et la ligne qui se remplissent mieux et non l'épaisseur d'encre qui augmente. Cela permet cependant d'expliquer une anomalie que nous allons voir tout de suite.

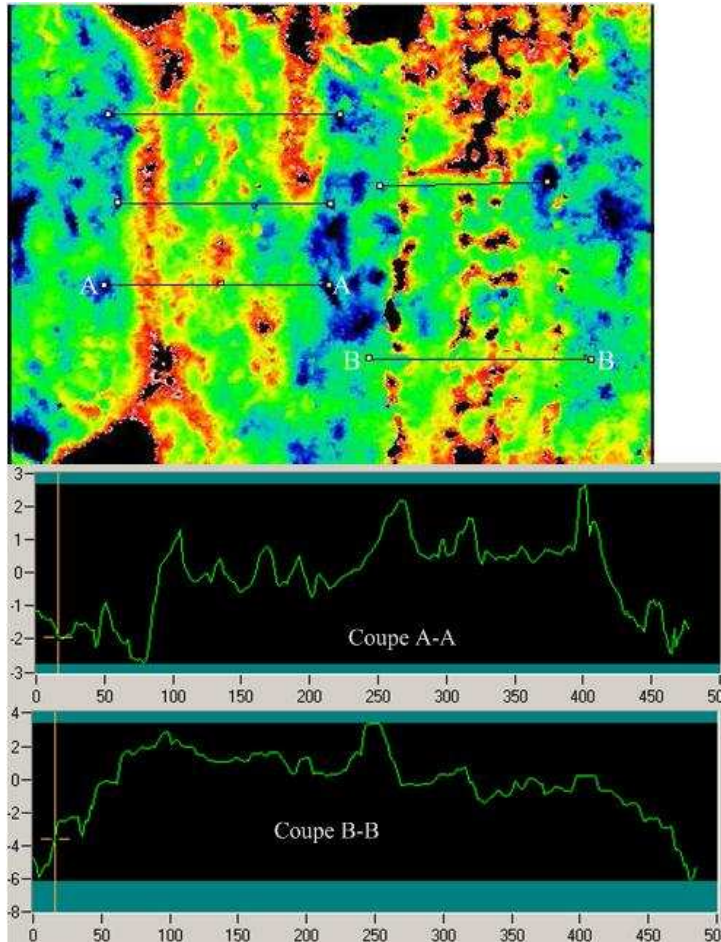


Figure 116 : Mesure de la hauteur faite au Topo3D sur l'échantillon imprimé en deux passes (figure 114).

En effet, les parties associées à la deuxième résonance sont les branches convoluées qui présentent de nombreux angles droits difficiles à reproduire parfaitement lors d'une impression. En se remémorant la figure 110, on voit qu'avec un anilox de $30\text{cm}^3/\text{m}^2$, l'angle n'est pas correctement constitué. L'extérieur est dépourvu d'encre car le halo en a accaparé la majorité, tandis que l'intérieur en possède un gros surplus. Pour un anilox de $13\text{cm}^3/\text{m}^2$, le manquement à l'extérieur est aussi important, si ce n'est plus, en raison d'un apport d'encre limité. On voit aussi figure 115 qu'un surplus existe à l'intérieur, surplus d'environ $125\mu\text{m}$ qui est souvent déconnecté du motif central en raison du vide entre le halo et l'intérieur du motif. De plus, ce surplus est de dimension inférieure à celui présent avec l'anilox de $30\text{cm}^3/\text{m}^2$ soit $200\mu\text{m}$ environ. En revanche,

avec un anilox de $16\text{cm}^3/\text{m}^2$, le vide entre le halo et le motif est comblé et le halo n'accapare pas autant d'encre qu'avec l'anilox de $30\text{cm}^3/\text{m}^2$. Cela produit un angle droit correctement constitué à l'extérieur mais avec un surplus d'encre d'environ $185\mu\text{m}$ à l'intérieur, comme le montre la figure 115.

Ce surplus de matière présent sur l'intérieur des angles droits permet d'expliquer une autre anomalie visible sur la mesure figure 113. En effet, on observe un décalage en fréquence de plus en plus important pour la deuxième bande au fur et à mesure de l'augmentation du volume de l'anilox. Ce phénomène pourrait être dû à l'augmentation de la taille du surplus dans les angles droits présents uniquement dans les parties du motif responsables de cette deuxième bande rejetée. Pour s'en assurer, une simulation est faite. En effet, ces surplus d'encre sont présents à chaque fois et peuvent donc être modélisés. On peut voir sur la figure 117 le modèle pris pour faire la modélisation. Le surplus d'encre avec lequel nous avons effectué les simulations est de $85\mu\text{m}$ environ. Nous avons aussi tenté de modéliser le manquement d'encre, avec les mêmes dimensions que le surplus, dans les angles extérieurs afin de voir si ce défaut avait un effet lorsqu'il était modélisé de façon régulière.

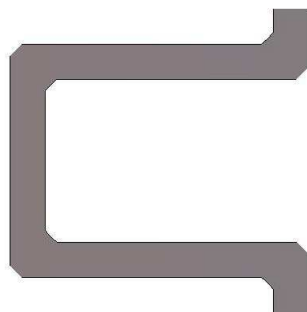


Figure 117 : Modélisation des angles droits présents dans le motif treepôle.

La figure 118 montre le résultat de cette simulation comparé au motif idéal. On observe bien un décalage en fréquence uniquement présent sur la deuxième bande. Ce décalage se produit bien vers les hautes fréquences comme sur nos mesures. Nous pouvons donc confirmer notre hypothèse concernant ce décalage et affirmer qu'il est responsable de la différence entre simulation et mesure ainsi que de l'augmentation de la deuxième fréquence de résonance pour des anilox de plus gros volume.

En revanche, l'absence d'encre dans les parties extérieures des angles droits ne provoque aucun effet. Il est donc probable que les petites pertes d'atténuation observées

sur certains échantillons soient dues à d'autres manquements trop irréguliers pour être simulés.

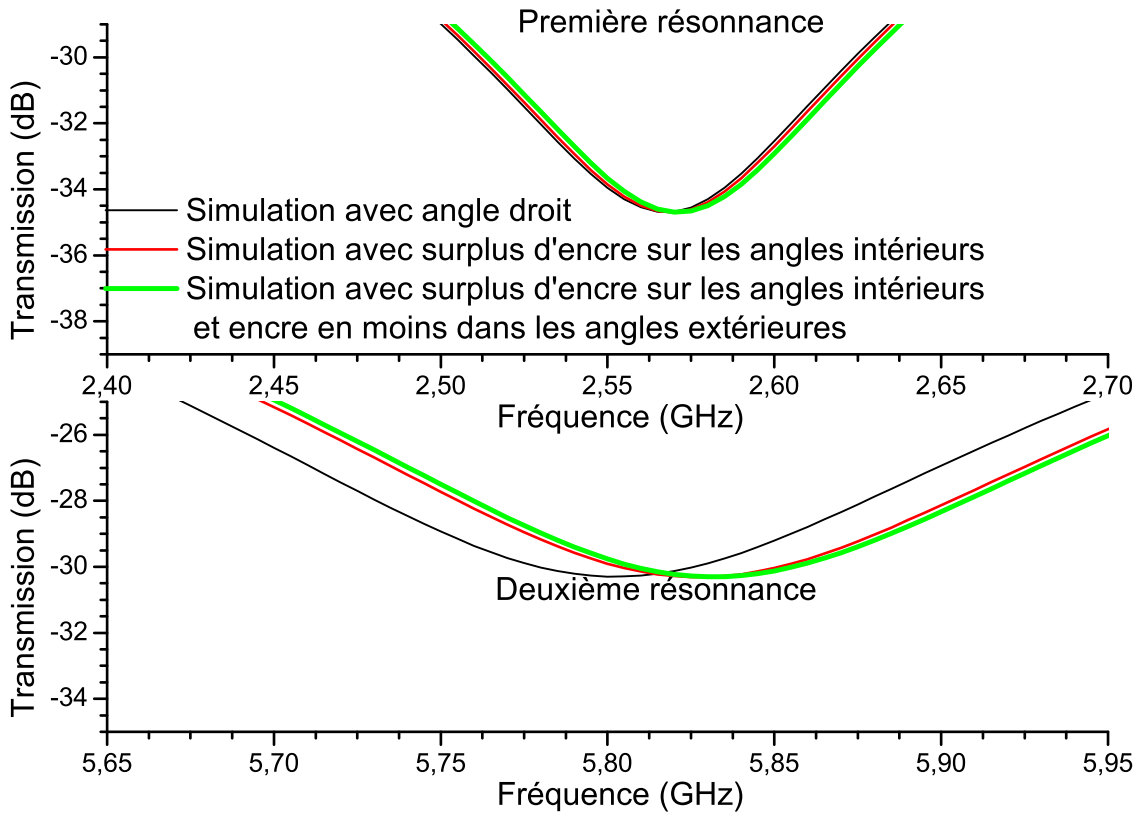


Figure 118 : Simulations d'un motif treepôle WiFi avec modification des angles comparé au motif idéal. Le surplus d'encre est de $85\mu\text{m}$ à l'intérieur et le manque est de $85\mu\text{m}$ à l'extérieur.

L'utilisation de l'anilox de $16\text{cm}^3/\text{m}^2$ semble donc être la meilleure possibilité en termes de performance. Cependant des essais complémentaires d'ajustement de pression sur des machines industrielles ainsi qu'une étude économique performances/prix, pourraient arriver à des conclusions légèrement différentes.

v Confirmation de la possibilité d'utiliser des bandelettes de papier

Nous avons conclu dans la partie VI.2 que l'utilisation de bandelettes, au lieu d'échantillon complet, n'avait pas d'impact si un positionnement correct était respecté. Pour d'avantage confirmer ce point, un échantillon a été constitué à partir de bandelettes découpées dans un essai industriel puis, assemblées de la même façon que pour les essais en laboratoire. La comparaison entre les mesures, voir la figure 119, montre que l'utilisation de bandelettes plutôt qu'un échantillon complet ne pose pas de problèmes.

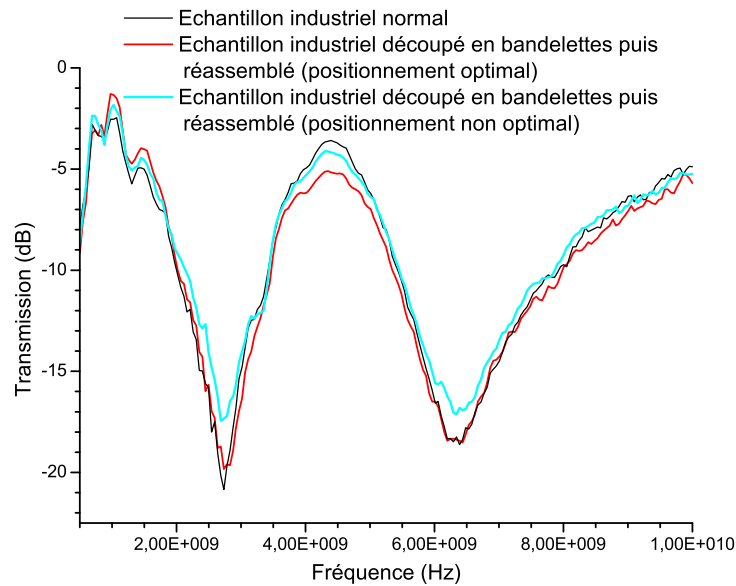


Figure 119 : Comparaison entre un échantillon complet et un échantillon constitué de bandelettes, issues des essais industriels, découpés puis réassemblés. Mesures effectuées avec un adaptateur A4.

VI.4 Mise en application du métapapier

VI.4.a Substrats rencontrés

Nous avons déjà expliqué qu'une SSF voyait sa fréquence de coupure modifiée en fonction de l'épaisseur et de la permittivité du substrat qui l'entoure et que le niveau d'atténuation était réduit si les pertes du substrat augmentaient. Il est donc important d'appréhender quels seront les matériaux en contact avec le métapapier. En effet, même si le substrat « primaire » est le papier, il n'est pas épais et l'effet du mur sur lequel il sera collé sera important. Il faut donc répertorier les types de substrats rencontrés et leurs caractéristiques. Pour cela, nous nous sommes aidés de deux rapports [150][151]. Ceux-ci décrivent les meilleures possibilités concernant l'incorporation de SSF dans des bâtiments. Ils en ont conclu que les matériaux importants étaient le plâtre, le béton, la brique et des blocs dit « aérés » (sorte de parpaing). En revanche, dans le cas présent, même si ces matériaux sont bien présents dans l'assemblage d'un mur, seules les premières couches auront un effet.

En effet, nous avons vu dans la section I.4.c qu'au-delà d'une épaisseur de $\lambda/20$, le substrat pouvait être considéré comme infini. A 2.45GHz, qui est la plus grande longueur d'onde d'intérêt pour nos échantillons papier, cette épaisseur est inférieure à 6mm qui est le plus petit standard de plaque de plâtre utilisé. Dans le cas d'échantillon

GSM, il est possible que 13mm de plâtre (standard le plus courant) suffise tout juste à garantir ce critère normalement proche des 17mm à 900MHz. Ainsi, étant donnée la composition des murs aujourd'hui, nous ne prendrons en compte que deux matériaux : les plaques de plâtre et les panneaux de bois. En effet, même si le bois n'a pas été identifié par [150] et [151], l'industriel supportant le présent projet, persuadé que les constructions en bois vont se développer, souhaite en connaître l'impact sur le métapapier.

La permittivité et les pertes de ces deux matériaux sont (voir [150] et tableau 1) :

- plaques de plâtre : $\varepsilon_r = 2.25 \pm 0.3$ et $\tan \delta = 0.015 \pm 0.05$;
- panneaux de bois : $\varepsilon_r = 2.4 \pm 0.7$ et $\tan \delta = 0.09 \pm 0.04$.

Notons que les panneaux de bois peuvent être de nature très diverses.

Dans un premier temps, il est évident que pour poser le métapapier il faut utiliser de la colle à tapisserie. Bien que le film de colle après séchage soit probablement très mince il faudra en caractériser les effets. Avant cela, l'effet du substrat qu'est la plaque de plâtre doit être caractérisé. Enfin, une plaque de bois sera utilisée à la place d'une plaque de plâtre afin d'en caractériser les effets.

En concertation avec l'industriel suivant ce projet, nous avons considéré que le plus approprié pour le métapapier était de le développer comme un papier-peint de sous-couche à recouvrir avec un papier-peint décoratif. Ainsi, dans un deuxième temps, il faut prendre en compte l'effet de ce dernier qui sera collé sur métapapier.

Sachant qu'il existe de nombreux types de papier-peint et de colle, que la surface du papier-peint n'est pas du tout homogène (figure 120) et que la colle n'est pas répartie de façon homogène, nous n'avons pas cherché à mesurer ou à connaître les caractéristiques électromagnétiques de ces matériaux afin d'en simuler les effets. En revanche, la société s'intéressant au projet nous a fourni un panel de matériaux couvrant l'ensemble des types de produits existants soit : 2 colles et 7 papiers-peints. De cette façon, nous pourrons évaluer les modifications que provoquent ces matériaux sur le comportement du métapapier et ainsi en adapter le fonctionnement correctement.

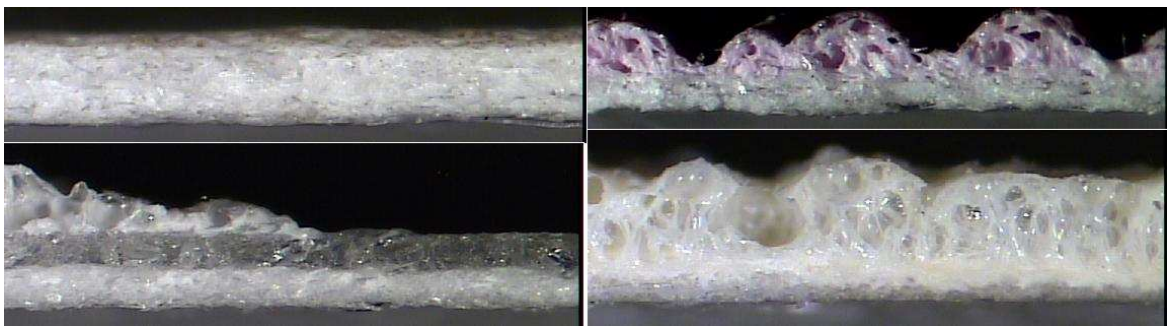


Figure 120 : Photographie à la même échelle de la tranche de quatre papiers-peints différents.

i Démarche suivie

Afin d'évaluer l'effet des substrats entourant le métapapier, nous utilisons des échantillons issus des essais d'impression du CTP. En effet, durant cette campagne d'essai, nous ne disposons pas encore des essais industriels. Pour faciliter la comparaison, là encore toutes les mesures sont lissées.

Tout d'abord, afin d'évaluer l'impact des murs, nous utilisons des plaques de plâtre découpées au format de l'ouverture de notre panneau métallique. Les échantillons de métapapier sont fixés sur le plâtre à l'aide d'adhésif, et l'adaptateur A4 vient les plaquer contre le plâtre. De cette façon, nous pouvons appréhender les effets d'une plaque de plâtre sur le métapapier.

Dans un deuxième temps, nous enlevons l'adhésif et utilisons de la colle à tapisserie pour reconstituer l'échantillon sur la plaque de plâtre. Ceci nous permet d'appréhender les effets de la colle. Enfin, ces étapes sont répétées sur une plaque de bois au lieu d'une plaque de plâtre afin de visualiser les différences provoquées sur le comportement du métapapier.

ii Plaque de plâtre

Concernant cette première étape, elle est à la seule pour laquelle nous avons simulé l'effet. En effet, en modélisant une SSF dans CST avec comme substrat un papier suivi ou non d'une plaque de plâtre, on est en mesure de prédire les effets de cette dernière. Le papier a été simulé avec une épaisseur de $300\mu\text{m}$, une permittivité de 3.2 et des pertes de 0.05, le conducteur avec une épaisseur de $10\mu\text{m}$ et de conductivité 1.10^5S/m et le plâtre avec une permittivité de 2.3, des pertes de 0.1 et une épaisseur de 13mm. La figure 121 montre le résultat de ces simulations (avec et sans plâtre).

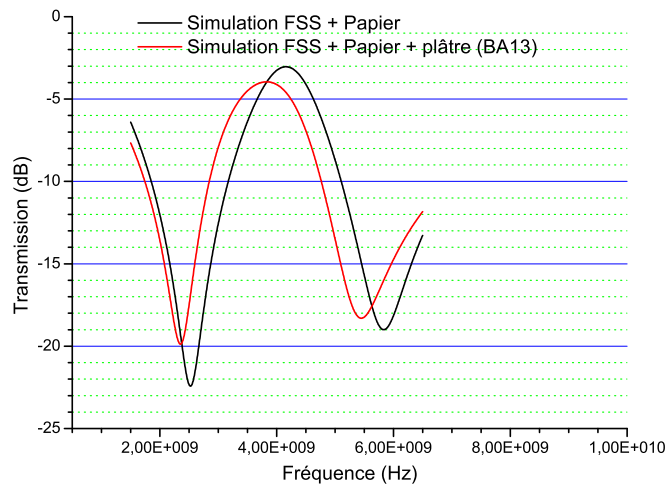


Figure 121 : Simulation d'une SSF sur papier comparée à une SSF sur du papier et du plâtre.

On s'attend donc durant les mesures à obtenir un léger décalage en fréquence et une réduction d'atténuation de l'ordre d'1dB sur la première bande et de 2 à 3dB sur la deuxième. Afin de garantir la répétabilité de ces mesures, quatre échantillons sont mesurés à chaque fois. On observe sur la figure 122 les photographies de la mise en place des échantillons sur les plaques de plâtre et sur la figure 123 les résultats de mesure avec et sans plâtre pour ces quatre échantillons.

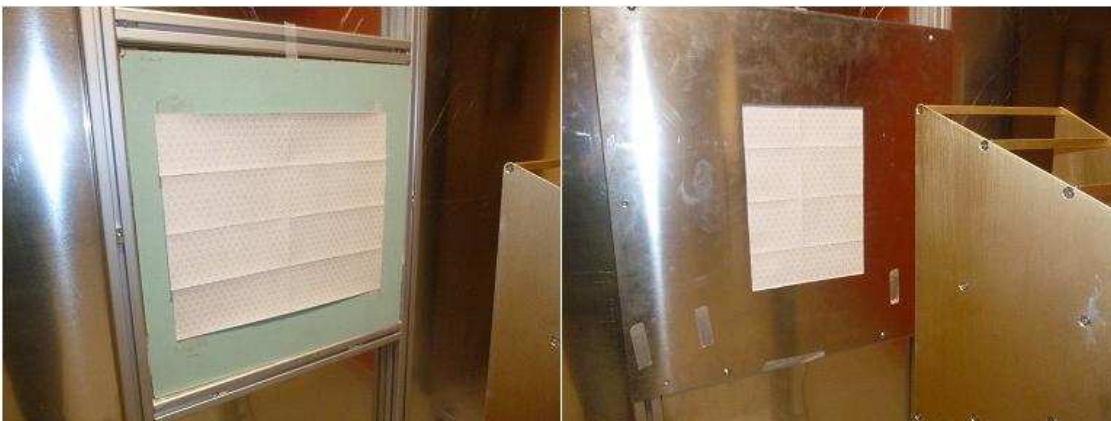


Figure 122 : Photographies de la mise en place des échantillons sur une plaque de plâtre à l'aide d'adhésif. À gauche avant le positionnement de l'adaptateur A4 et à droite après.

On observe, sur la première bande, une réduction de l'atténuation de l'ordre de 3dB. Cette réduction d'atténuation est, comme prévue en simulation, plus marquée pour la première bande que pour la deuxième. Elle est en effet de 0 à 2dB pour la deuxième bande, contrairement au 1dB prévu en simulation. Enfin, seule discordance par rapport aux simulations, le décalage fréquentiel est très faible, voire inexistant, comparé aux simulations.

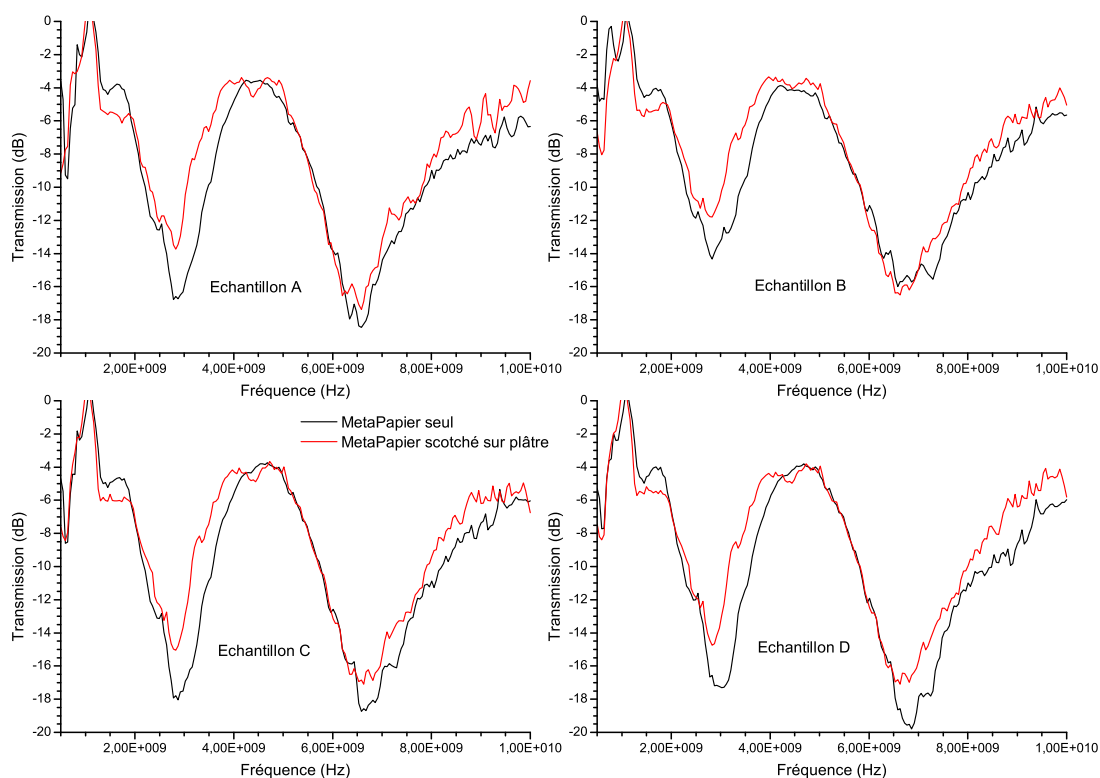


Figure 123 : Mesures de l'efficacité de filtrage avec et sans plâtre pour quatre échantillons papier du CTP.

Les petites différences avec la simulation concernant le niveau d'atténuation peuvent s'expliquer par le positionnement de l'échantillon qui diffère d'une mesure à l'autre. En effet, en l'absence de plâtre, l'échantillon est fixé sur l'adaptateur A4. Il est donc facile de le positionner correctement. Par contre, une fois le plâtre installé, l'échantillon est positionné avant la mise en place de l'adaptateur, il est alors difficile de reproduire à l'identique la position de la première mesure.

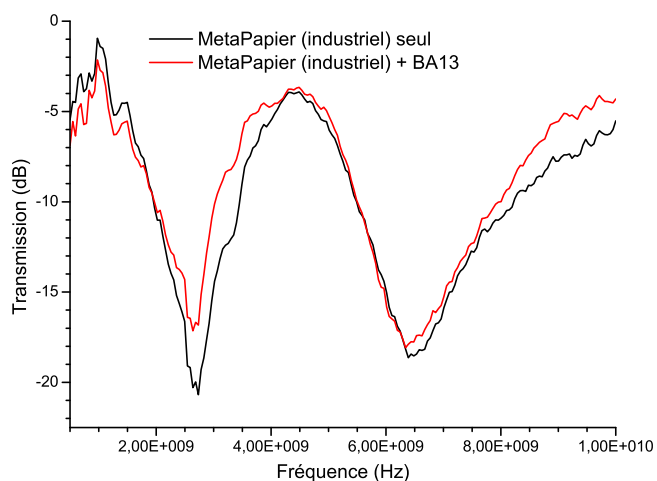


Figure 124 : Mesures de l'efficacité de filtrage avec et sans plâtre pour un échantillon industriel.

Pour confirmer ceci, nous avons fait une mesure avec un échantillon industriel pour lequel aucune coupure n'existe. Quel que soit le positionnement il n'est donc pas censé y avoir de changement de la mesure car aucun positionnement optimal n'est à respecter. Sur la figure 124, on s'aperçoit que les résultats de mesures sont identiques, excepté pour la deuxième bande pour laquelle une légère amélioration a lieu. Cette amélioration rend nos mesures tout à fait conformes aux valeurs d'atténuation obtenues en simulation pour la deuxième bande et confirme l'hypothèse avancée.

Concernant le très faible décalage en fréquence, une autre raison peut être évoquée. Il semblerait que l'échantillon ne soit jamais parfaitement plaqué contre le plâtre et que le filet d'air présent, estimé jusqu'à 3mm par endroit, est suffisant pour atténuer complètement l'effet du plâtre en tant que substrat ne provoquant ainsi ni décalage en fréquence ni baisse d'atténuation. Or, une baisse existe, sur des échantillons industriels ou de laboratoire. Il est donc possible que la perte d'atténuation due à la présence du plâtre soit provoquée par un autre phénomène que les pertes induites par le plâtre. Il pourrait s'agir d'interférences destructrices entre différentes ondes réfléchies aux différentes interfaces (métapapier/air, air/plâtre, plâtre/air). Les tendances observées et l'hypothèse donnée semblent confirmées par les travaux [152] qui étudient l'influence d'un gap d'air entre une SSF et une plaque de plâtre. Quoiqu'il en soit, ce cas n'arrivera pas dans la réalité grâce à la colle.

iii Colle

Afin d'éliminer le filet d'air toujours présent lorsqu'on utilise de l'adhésif, nous avons procédé aux essais avec de la colle à tapisserie. Nous utilisons deux types de colle représentant l'intégralité de celles existantes. Une s'applique sur le papier-peint (Perfax) et l'autre s'applique directement sur la plaque de plâtre (Metylan). Leur aspect est aussi très différent. Les quatre échantillons que nous avons étudiés précédemment sont utilisés.

Une fois la colle convenablement séchée, nous avons obtenu les mesures présentées à la figure 125. En effet, au bout de quelques heures, la première mesure effectuée montrait une très nette dégradation des résultats avec la colle Perfax qui s'applique sur le papier. Il s'agissait en réalité d'un problème de séchage qui ne se pose

pas en utilisant la colle Metylan car le papier de la plaque de plâtre en absorbe une grande partie.

On observe tout d'abord que la présence de colle ne modifie pas, ou très peu, l'atténuation relevée lorsque l'on scotche l'échantillon.

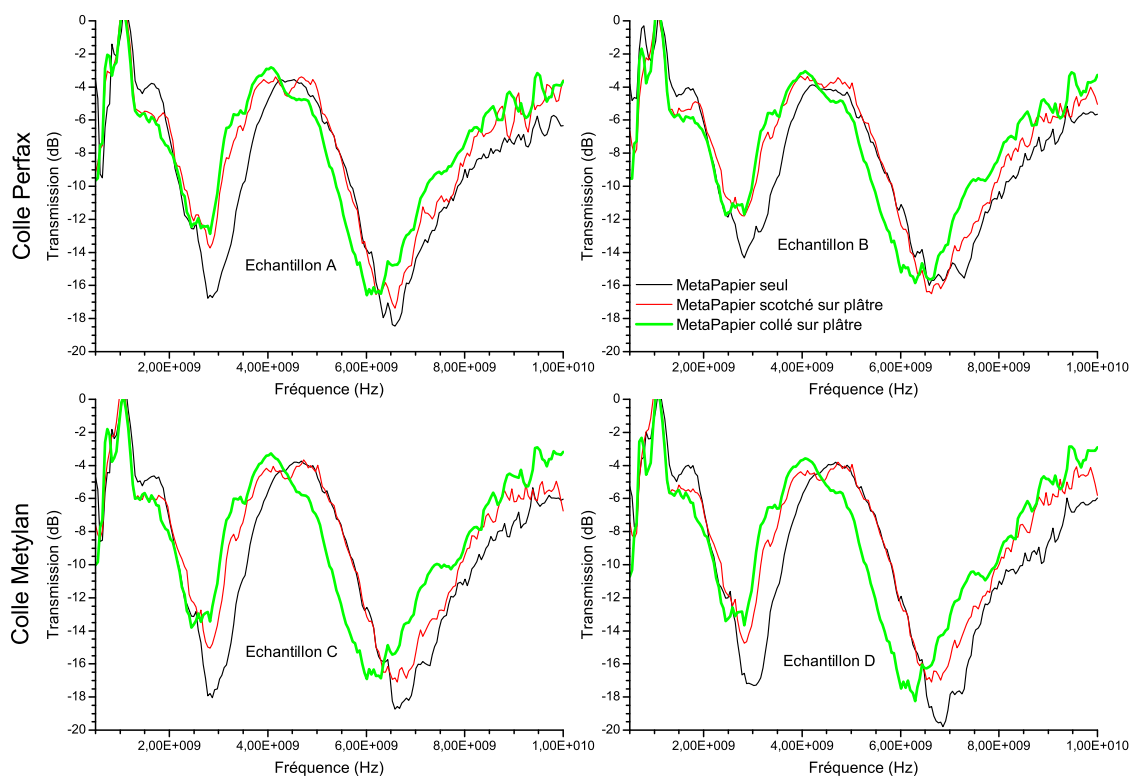


Figure 125 : Mesures de l'efficacité de filtrage avec et sans plâtre pour quatre échantillons collés ou scotchés.

Concernant le décalage en fréquence il est bien présent cette fois-ci. On notera qu'il semble être légèrement plus important avec la colle Metylan que Perfax, ce qui pourrait vouloir dire que la disparition du filet d'air entre le papier et la plaque de plâtre n'est pas seule responsable de cette modification mais, que la colle joue un rôle en tant que substrat.

Normalement la présence d'une sous couche avant de mettre du papier-peint au mur est recommandée. Pour nous assurer que cette sous couche n'aurait aucun impact nous l'avons utilisée avant de coller un échantillon et avons obtenu le résultat figure 126. On observe alors des résultats similaires aux courbes de la figure 125 ce qui semble confirmer l'hypothèse précédente comme quoi c'est la colle et pas le plâtre qui produit la majorité du décalage en fréquence.

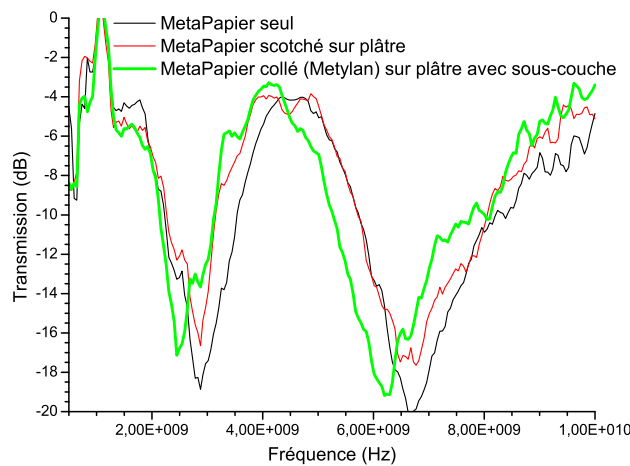


Figure 126 : Mesures de l'efficacité de filtrage d'un échantillon scotché sur du plâtre puis collé sur du plâtre disposant d'une sous couche d'accroche.

En effet, nous avons vu à la section I.4.civ qu'en présence d'un substrat, la fréquence de coupure était divisée par :

$$\sqrt{\frac{\varepsilon_r + 1}{2}}, \quad (6.1)$$

avec ε_r la permittivité équivalente de l'assemblage de matériaux et que ce coefficient doit encore être pondéré par l'épaisseur du matériau. Il est donc possible, étant donné les valeurs de permittivité et d'épaisseur mises en jeu, que le papier support d'impression et la colle représentent la contribution majeure de ce décalage en fréquence. Ce constat, s'il s'avère vrai, est de bon augure pour l'utilisation de différents substrats à la place de plaques de plâtre.

Nous savons désormais que coller le métapapier sur une plaque de plâtre n'engendre qu'un léger décalage en fréquence, facile à prendre en compte dans le design des motifs, et une perte d'atténuation de l'ordre de 2 à 3dB.

iv Bois

Nous avons reproduit exactement le même schéma de tests que pour le plâtre : mesures avec des échantillons scotchés et ensuite avec des échantillons collés. Différents types de bois ont été utilisés : le médium, l'aggloméré, l'OSB3 et le contreplaqué. Nous avons pu constater dans la littérature [153]-[154] que les valeurs de permittivité pouvaient être proches de celle d'une plaque de plâtre et que les pertes étaient probablement plus importantes (jusqu'à 0.2). Pour garantir l'accroche de la colle

sur ces surfaces, chaque bois a été préalablement recouvert d'une sous couche. On peut observer sur la figure 127 les mesures effectuées.

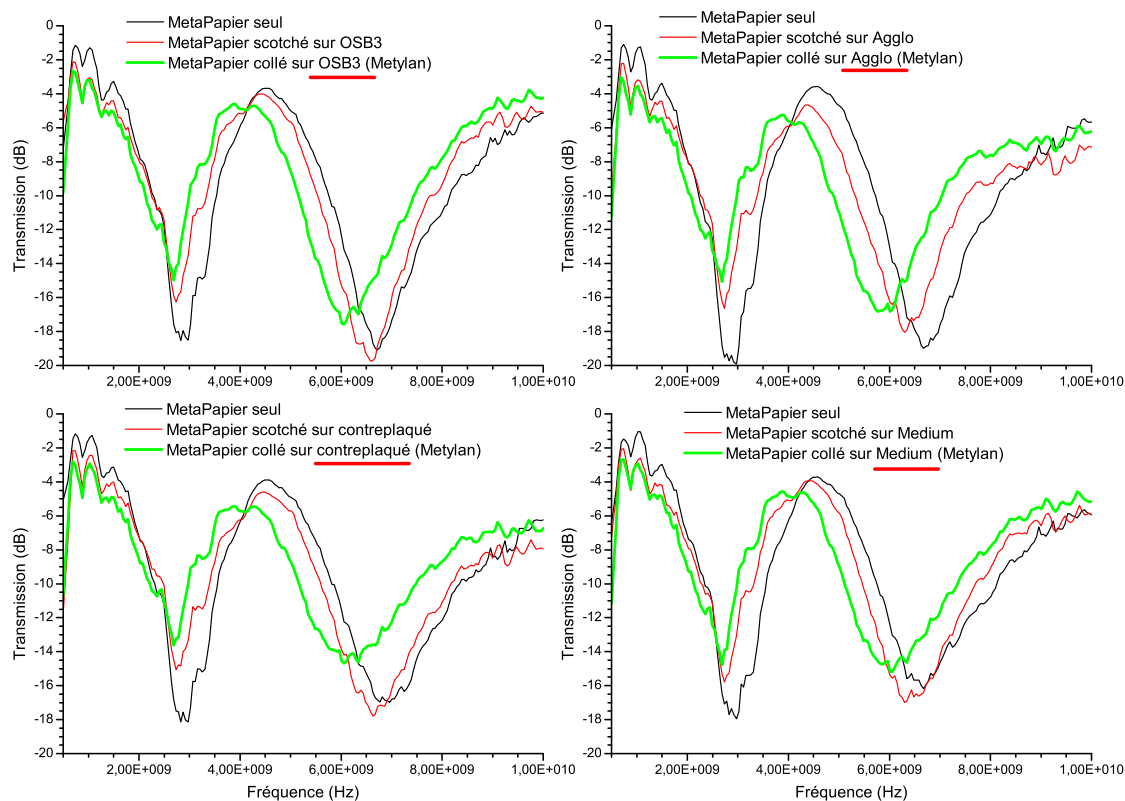


Figure 127 : Mesures de l'efficacité de filtrage d'échantillons à base de bois.

On obtient exactement le même comportement que précédemment pour le positionnement des échantillons sur le bois à l'aide d'adhésif, à savoir, pas ou très peu d'impact sur la deuxième bande de fréquence et une réduction de deux à trois dB pour la première. Une fois les papiers collés sur le bois, on observe le même léger décalage en fréquence que pour le plâtre mais, cette fois-ci, une réduction supplémentaire de l'atténuation de 1 à 2dB a lieu. Il est possible que cette diminution de l'efficacité de filtrage apparaisse en raison des pertes du bois, bien que, comme nous l'avons déduit des mesures précédentes, le substrat sous la colle et la sous-couche n'influence probablement que très peu le fonctionnement.

Quoiqu'il en soit, les fréquences filtrées sont les bonnes et malgré cette légère baisse de performance, nous pouvons utiliser métapapier indifféremment sur du bois ou sur du plâtre.

VI.4.b Superstrats

i Papier-peint

Il est totalement utopique de tenter de faire une simulation étant donné que les papiers-peints utilisés sont tous différents les uns des autres, inhomogènes (voir la figure 120) et que nous ne connaissons pas leurs caractéristiques électromagnétiques tout comme celles de la colle. Notre partenaire industriel, en accord avec nos recommandations, a estimé que 7 échantillons de papier suffisaient pour couvrir l'ensemble des modèles existants. Nous commencerons par en apposer un différent sur chacun des quatre échantillons précédemment présentés. Nous poursuivons en utilisant 3 nouveaux échantillons afin d'apposer les 3 papiers-peints restant. Le temps de séchage des sept échantillons est à chaque fois supérieur à une semaine. La mesure de leur efficacité de filtrage est donnée figure 128. La dénomination des papiers est celle utilisée par notre partenaire industriel.

Sur les sept graphiques, on note que le comportement est toujours le même. Un décalage en fréquence conséquent, quasiment identique pour tous, et une amélioration de l'efficacité de filtrage qui, à chaque fois, atteint le même niveau d'atténuation que le métapapier seul.

Concernant le décalage en fréquence, il est plus important que pour les essais précédents. Cela paraît normal car le papier et la colle sont apposés directement sur la SSF. Cependant, il suffit de prendre en compte correctement dès le design des motifs ce décalage pour que les fréquences filtrées soient bien celles du WiFi.

Concernant l'amélioration de l'atténuation, nous n'avons pas, à l'heure actuelle, d'explications parfaitement adaptées à la situation rencontrée.

Il aurait pu être possible qu'une des deux colles soit à préférer en raison de son type d'application. En effet, pour la colle Metylan, nous l'appliquons à l'aide d'un pinceau large à poil dur directement sur la face imprimée de SSF et il eût été possible que nous dégradions l'impression. Or, ce n'est pas le cas au vu des mesures. Le métapapier apparaît donc assez robuste pour supporter ce type de traitement.

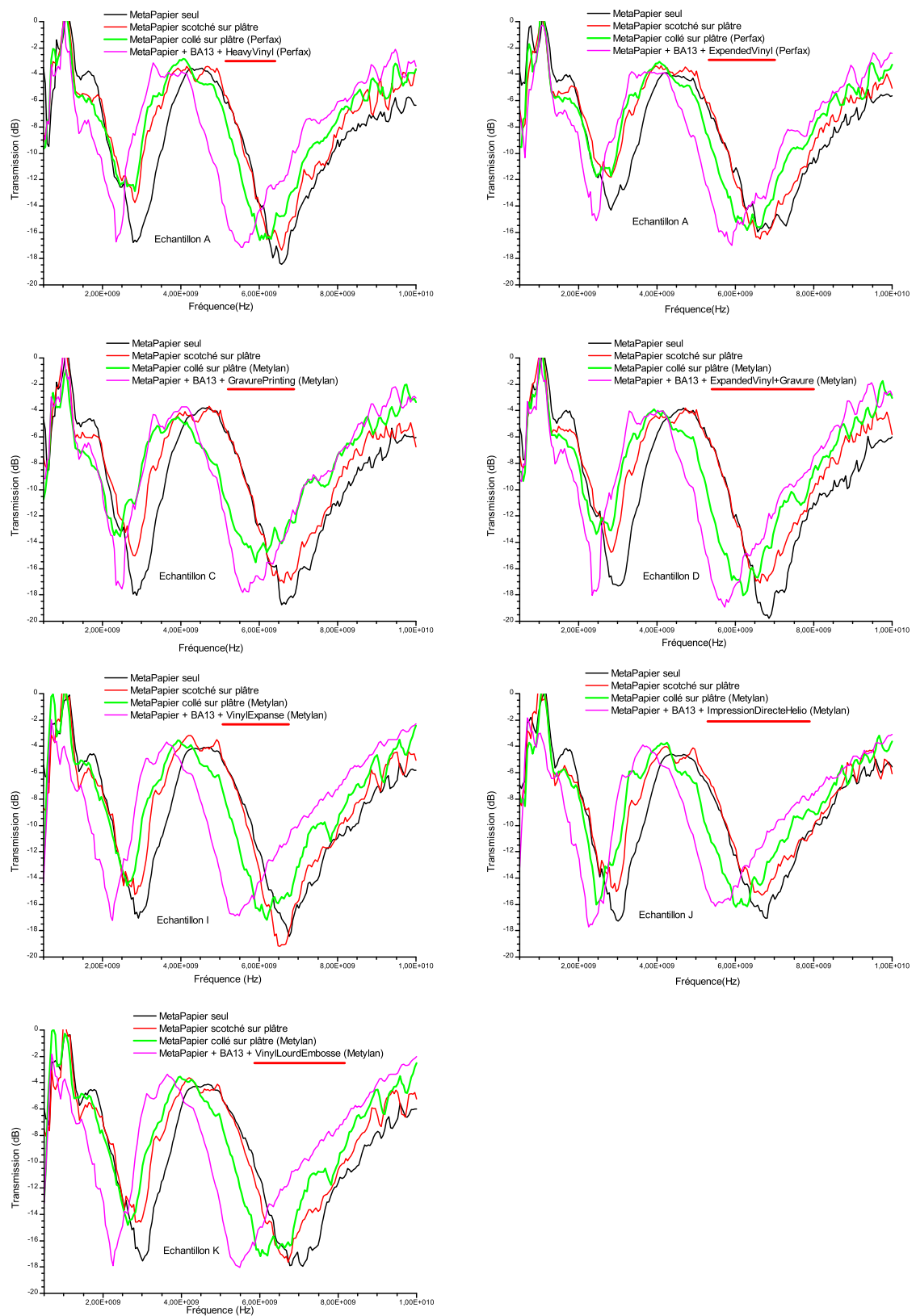


Figure 128 : Mesures de l'efficacité de filtrage d'échantillons recouverts de papier-peint.

Concernant l'utilisation de bois au lieu de plâtre, une fois recouvert de papier-peint le comportement est le même pour la deuxième bande de

fréquence : augmentation de l'atténuation de quelques dB. En revanche, pour la première bande de fréquence, le niveau d'atténuation n'est pas amélioré en présence d'une couche de papier-peint décoratif. Il est cependant difficile de généraliser ce fonctionnement car seul un échantillon sur les quatre types de bois pris en compte a été réalisé. Quoiqu'il en soit, malgré cette légère baisse de performance l'utilisation du bois à la place du plâtre peut être considérée.

Nous pouvons donc conclure que les 20dB d'atténuation sont bien atteints. En effet, comme le fonctionnement est exactement le même avec les échantillons industriels, au final, la valeur d'atténuation du papier seul est la même qu'avec une plaque de plâtre et une seconde couche de papier-peint décoratif.

ii Métapapier

Cette dernière partie permet de montrer les possibilités ou impossibilités de doubler l'atténuation en doublant les couches de métapapier. Deux possibilités réalistes existent : métapapier/métapapier ou métapapier de part et d'autre d'une plaque de plâtre.

Afin d'appréhender le comportement du métapapier dans ces deux cas des simulations sont effectuées. Dans le cas où deux couches du métapapier sont superposées il a été décidé d'aligner les motifs entre les deux couches. En effet, l'installateur final du métapapier ne se préoccupera pas de cela et un alignement parfait correspond au pire des cas possibles en termes d'interactions entre les SSF. Les résultats de simulation sont présentés à la figure 129.

Il apparaît vite inutile de superposer deux couches de métapapier. L'atténuation augmente légèrement (2 à 5dB) mais un décalage fréquentiel se produit. Ce constat est d'ailleurs confirmé par une mesure dont les résultats sont exposés figure 130. La raison est simple, il s'agit d'une interaction entre les deux SSF qui produit un effet dont les propriétés sont proches mais différentes de notre motif imprimé.

Il apparaît aussi inutile de tenter de séparer deux couches de métapapier par une couche de papier-peint. Une modélisation faite avec un papier de 300 μ m d'épaisseur, de permittivité 3.2 et ayant un facteur de perte de 0.05 n'a montré aucune amélioration comme on peut le voir à la figure 129.

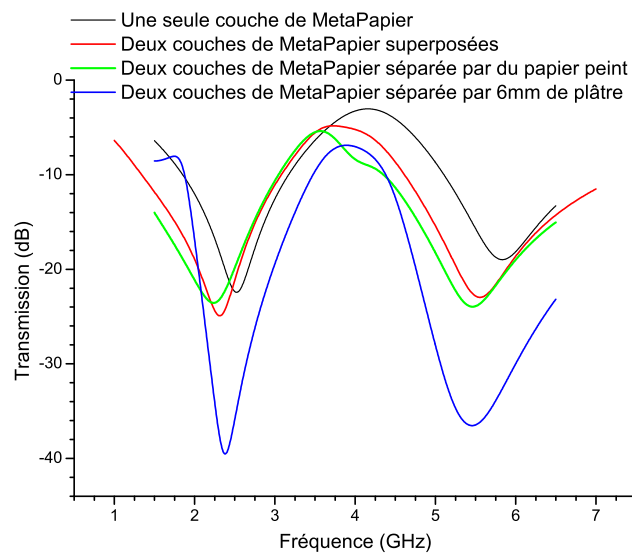


Figure 129 : Simulations de l'efficacité de filtrage de différents agencements de couches de métapapier.

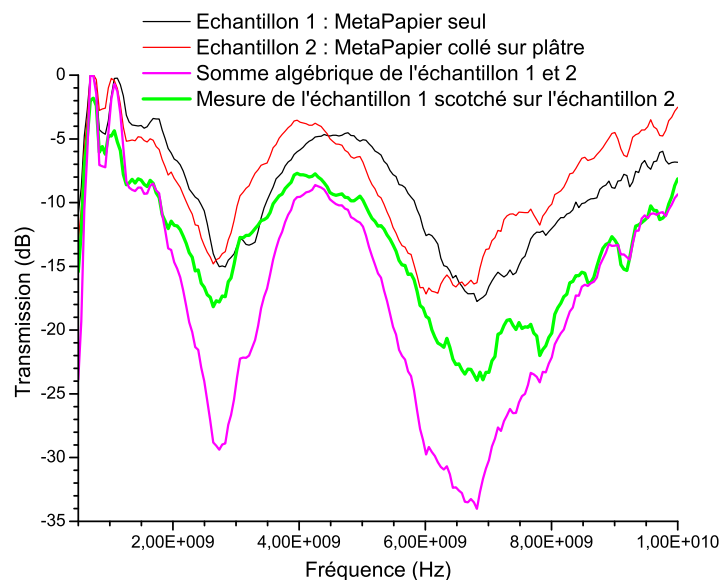


Figure 130 : Mesures de deux échantillons de métapapier superposés.

La deuxième possibilité, consistant à séparer les deux couches de métapapier par quelques millimètres de plâtre, produit de très bons résultats. En effet, dans ce cas, l'efficacité de filtrage est quasiment doublée selon les simulations. Il en est de même sur les mesures présentées à la figure 131.

Une fois le deuxième échantillon collé sur la deuxième face on dépasse même cette somme algébrique. C'est en effet normal car une fois le second échantillon collé, un décalage en fréquence se produit pour se rapprocher de la fréquence filtrée par l'autre échantillon qui, lui, est couvert d'une couche de papier-peint. La somme devrait donc augmenter comme c'est le cas sur la mesure que l'on a faite.

Ces résultats sont intéressants car ils montrent que l'utilisation d'une plaque de plâtre disposant d'une atténuation supérieure à 40dB, avec des papiers industriels, peut être fabriquée.

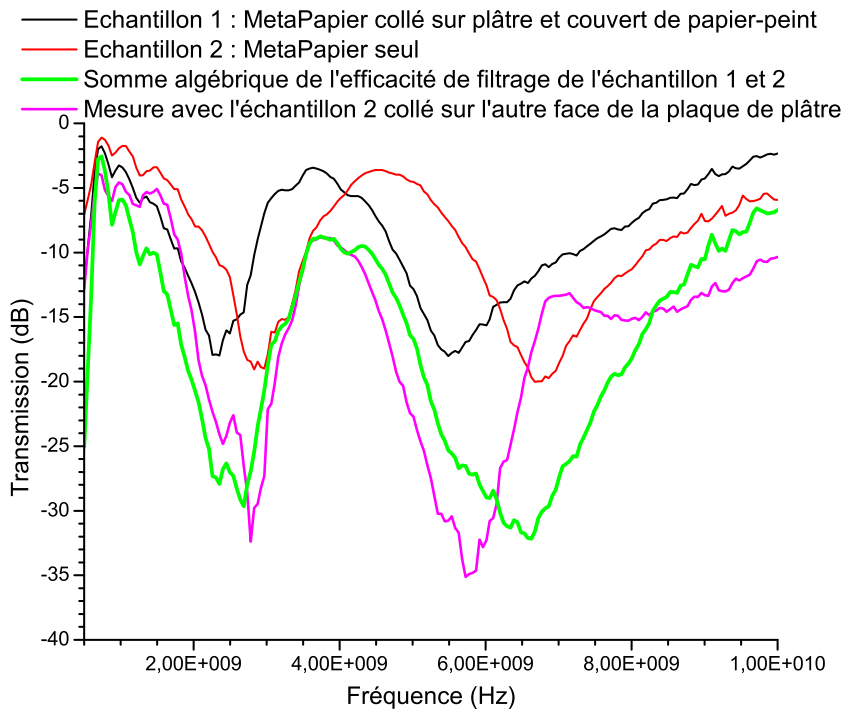


Figure 131 : Mesures de deux échantillons de métapapier collés et séparés par 13mm de plâtre.

VI.5 Métapapier en conditions réelles

Dans cette section, nous abordons rapidement quelques questions légitimes quant à l'utilisation du métapapier dans une pièce d'habitation ou d'un immeuble. Plus précisément, comment gérer les ouvertures que représentent les portes et les fenêtres ? Quid des sols et des plafonds ?

Pour bien appréhender ces questions, une analyse statistique basée sur la propagation des OEM (lancer de rayon) en milieu urbain ou « indoor » (milieu intérieur) serait nécessaire. C'est un domaine en soi. Une telle analyse n'est donc pas faite. Certains travaux publiés donnent cependant de bonnes indications sur les tendances générales [93].

Commençons par étudier le cas des fenêtres et des portes. En effet, si l'ensemble des murs est couvert de métapapier et que les portes et fenêtres n'en sont pas couvertes, le champ EM va s'introduire dans l'enceinte par ces ouvertures et se propager. Ainsi,

même s'il y a une réduction du niveau moyen de champ EM présent dans la pièce, celle-ci risque d'être faible à cause de cette faille dans le filtrage. De plus, la possibilité d'un trajet direct, à forte puissance, passant par ces ouvertures existe. Dans ce cas, l'onde sera réfléchiée à l'intérieur de l'enceinte protégée au lieu de continuer à se propager produisant ainsi l'effet inverse de celui escompté.

VI.5.a Fenêtres

Les fenêtres sont importantes car elles laissent très bien passer les ondes et sont très souvent positionnées de telle sorte que les ondes entrantes se repartissent partout dans une pièce. De nombreuses solutions existent pour diminuer la transmission à travers ces surfaces.

Une première solution est d'imprimer directement sur le verre, voire à l'intérieur d'un double vitrage des motifs de SSF à l'aide de matériaux conducteurs et transparents. L'ITO est un bon candidat, bien connu et dont le dépôt est bien maîtrisé, mais il est aussi possible d'envisager l'utilisation de fines couches d'encre à base de particules d'argent permettant de maintenir une bonne transparence [155][156]. Ainsi, l'alliance de cela avec nos motifs ne couvrant que 20% de la surface permettrait à la lumière de rester importante dans la pièce.

Une autre solution existe actuellement et est déjà déployée dans nombres d'immeubles commerciaux. En effet, les fenêtres des bureaux d'affaires sont presque toujours teintées et le matériau utilisé bloque aussi les ondes EM jusque dans les gammes de fréquence qui nous intéressent. La référence [157] montre d'ailleurs que ce peut être un problème et propose d'utiliser des SSF pour augmenter la transmission des ondes des téléphones portable ! Dans le cas présent ces fenêtres sont parfaites. Une solution pour filtrer les ondes passant par les fenêtres non teintées pourrait donc être d'utiliser des films teintés autocollants. Il est en effet fort probable que ces films minces présentent des capacités de filtrage intéressantes tout comme les vitres teintées.

Pour vérifier cette supposition, nous avons mesuré en chambre anéchoïque la transmission à travers ce matériau « peu couteux » et facile à mettre en place. Pour cela, nous avons utilisé un film teinté de marque *Réflexiv*® référence *SOL 102* décrit comme un film « anti-chaueur ». Nous avons positionné ce film de la même façon que nos échantillons de papier avec un adaptateur A4.

Le résultat de mesure en chambre anéchoïque est donné à la figure 132. Il est comparé à celui d'une tôle d'aluminium pour s'assurer que la mesure n'est pas faussée par les limitations du banc. Il en ressort qu'une atténuation de 30dB devrait pouvoir être garantie sur l'ensemble des bandes qui nous intéressent.

Dans le même ordre d'idée que la solution précédente, une dernière solution serait d'imprimer sur un plastique autocollant un motif de SSF. Les performances, en termes d'efficacité de filtrage et de transparence devraient être semblables à celles de l'impression directe sur verre mais le produit fini serait facilement intégrable dans les bâtiments existants à un coût abordable. Ce serait un complément tout indiqué au métapapier.

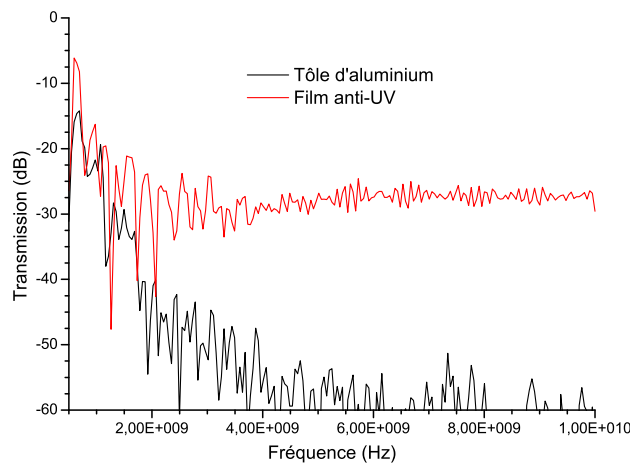


Figure 132 : Mesure de l'atténuation provoquée par un film anti UV comparée à une tôle d'aluminium.

VI.5.b Portes

Concernant les portes, elles sont moins nombreuses. Il est donc possible qu'elles ne nécessitent pas de traitement particulier. Cette hypothèse demande cependant à être confirmée par des simulations appropriées. En revanche, d'autres pistes peuvent être évoquées pour la majorité des portes.

La première et la plus simple d'entre elles serait de les recouvrir avec le métapapier. En effet, nous avons vu qu'il fonctionnait aussi sur différents types de bois. Cette solution est cependant rarement mise en application aujourd'hui chez les particuliers et encore moins chez des professionnels pour des raisons d'esthétique.

En effet, en général le bois d'une porte est recouvert par un papier décor prenant l'apparence et la couleur désirée. Une deuxième solution serait donc d'utiliser une face

de ce papier pour y imprimer nos SSF pour former une porte dont les caractéristiques électromagnétiques sont celles désirées. La possibilité d'utiliser le métapapier dans le procédé d'assemblage de la porte et du papier décor classique, à base de résine, doit cependant être vérifiée.

VI.5.c Sol et plafond

Enfin, intéressons-nous au cas du sol et du plafond. Les travaux [158] sont très intéressants. En effet, il apparait que la propagation entre étages, dans le cas d'un immeuble, est principalement liée aux trajets extérieurs (donc passant par les fenêtres ou les murs extérieurs). Ceci est vrai excepté pour l'étage directement en dessus ou en dessous où le trajet direct dispose d'encore assez de puissance après le passage à travers l'étage pour être repéré. La cause de ceci est très probablement la constitution des planchers de béton entre étage qui doit intégrer de plus nombreuses ferrailles que les murs. Ainsi nous pourrions en conclure qu'il n'y a pas de nécessité à apporter de modifications à ces surfaces car la réduction des ondes EM, aura bien lieu dans la majorité des cas.

En revanche, dans le cas de maison au lieu d'immeuble, le problème doit être différent à cause du plafond qui n'est pas forcément une chape de béton comme entre étage. Il serait probablement nécessaire de disposer d'un revêtement de sol et de plafond filtrant. Ceci reste néanmoins possible. En effet, pour le sol, de la même façon que pour les portes, que ce soit du parquet ou du linoléum, une couche de papier décor est utilisée. Elle pourrait donc servir de support d'impression pour les SSF afin de former un revêtement de sol filtrant. Concernant les plafonds, s'ils sont couverts de plâtre, la solution peut être le papier-peint. Pour des faux plafonds, une des faces des dalles de ce dernier peut être utilisée comme support d'impression de SSF.

VI.6 Démonstrateur

Pour finir, nous avons voulu vérifier l'effet réel du métapapier dans une pièce fermée. Grâce aux essais industriels nous disposons d'une quantité importante de métapapier fonctionnel aux fréquences WiFi. Nous restons cependant limité par la quantité produite de métapapier, soit environ 40m de papier d'une largeur de 26.5cm, qui permet de couvrir environ 10m². Ainsi, la taille de la pièce ne pourra excéder 1m par

1m par 2m. En effet, cela fait 4 faces de 2m² chacune à couvrir ainsi que le sol et le plafond d'1m² chacun, soit un total de 10m². Si possible nous désirons que ce démonstrateur soit démontable et remontable. Notre choix s'est donc porté sur un sauna dont nous avons fait l'acquisition.

L'avantage de ce sauna est notamment qu'il est vendu en kit et peut être démonté et remonté facilement. De plus, ses dimensions correspondent parfaitement aux dimensions souhaitées. On peut voir sur la figure 133 une photo du sauna.



Figure 133 : Photographies du sauna avant démontage..

VI.6.a Mise en place

Nous avons démonté l'ensemble de l'électronique ainsi que les grilles de protection présentes à l'intérieur.

Nous aurions pu tapisser directement l'intérieur du sauna sans trop de précautions étant donné que notre métapapier fonctionne aussi sur du bois. Cependant, nous avons décidé d'apposer des feuilles d'aluminium autocollantes sur l'ensemble du sauna, excepté la porte, comme sous-couche à notre métapapier. De cette façon, cela permettra de rendre « directif » notre démonstrateur. En effet, si un émetteur émet de façon trop proche et trop puissante, nous pourrions orienter le sauna afin que la porte ne

se trouve pas dans l'axe de l'émetteur. Cela limitera ainsi la puissance du trajet devant être atténuée par le métapapier et maximisera donc nos chances de stopper complètement ce réseau. En effet, il a été décidé que ce démonstrateur puisse montrer la disparition du réseau ou sa simple atténuation et ce quelque soit le lieu ou il est installé (congrès ou autre).

Pour empêcher que les SSF interagissent avec l'aluminium et ne filtrent pas les bonnes fréquences, nous les séparerons à l'aide de contreplaqué de 5mm vissé comme double cloison sur chaque face du sauna. L'aluminium se trouve sous cette cloison. Le métapapier est posé sur ce contreplaqué. La porte sera elle aussi couverte avec le contreplaqué et le métapapier. Enfin, une tapisserie standard est appliquée par dessus le métapapier. Un parquet est posé au sol. Le résultat final ainsi que des étapes de fabrication sont montrés dans la figure 134.



Figure 134 : Photographies de la mise en place du métapapier dans le sauna et du résultat final.

VI.6.b Mesures faites

Une fois la transformation du sauna en démonstrateur fini, nous avons effectué une mesure de l'atténuation provoquée par la fermeture de la porte. Pour cela, nous nous plaçons à l'intérieur du sauna, porte grande ouverte, et relevons à l'aide d'un mesureur de champ grand public de marque *cornet* et de référence *ED15SA* le niveau du signal Wifi émit par un routeur Wifi positionné à quelques mètres. Ce mesureur analyse le champ dans la bande 2,4-2.485GHz et peut renvoyer un résultat pour chaque canal WiFi. Nous fermons ensuite la porte et relevons à nouveau le niveau du signal.

Nous avons obtenu entre 20 et 25dB d'atténuation provoquée par la fermeture de la porte. Ce résultat est bon car il montre qu'en prenant des précautions sur la mise en place du métapapier, une atténuation supérieure à 20dB peut être atteinte. Cependant, ce moyen de mesure bien que donnant de bonnes indications n'est absolument pas démonstratif et demande à être confirmé par d'autres mesures.

Nous avons donc décidé d'utiliser un PC portable équipé d'une carte WiFi et d'un « sniffeur réseau » qui tourne en permanence. Ce petit programme appelé *Network Stumbler* permet d'afficher graphiquement le niveau de réception d'un signal WiFi en temps réel. De cette façon, les gens n'ont qu'à ouvrir ou fermer la porte pour observer l'influence sur un graphique. L'émetteur WiFi n'a quant à lui pas changé et reste placé à quelques mètres de distance afin d'obtenir un signal de l'ordre de -55dBm lorsque la porte est grande ouverte. Nous effectuons ensuite le relevé illustré à la figure 135 durant lequel nous effectuons plusieurs actions.

La première d'entre elles est la fermeture de la porte. Le signal passe immédiatement d'environ -55dBm à -85dBm soit une atténuation de 30dB grâce à la porte vitrée recouverte de métapapier et de deux couches de contreplaqué.

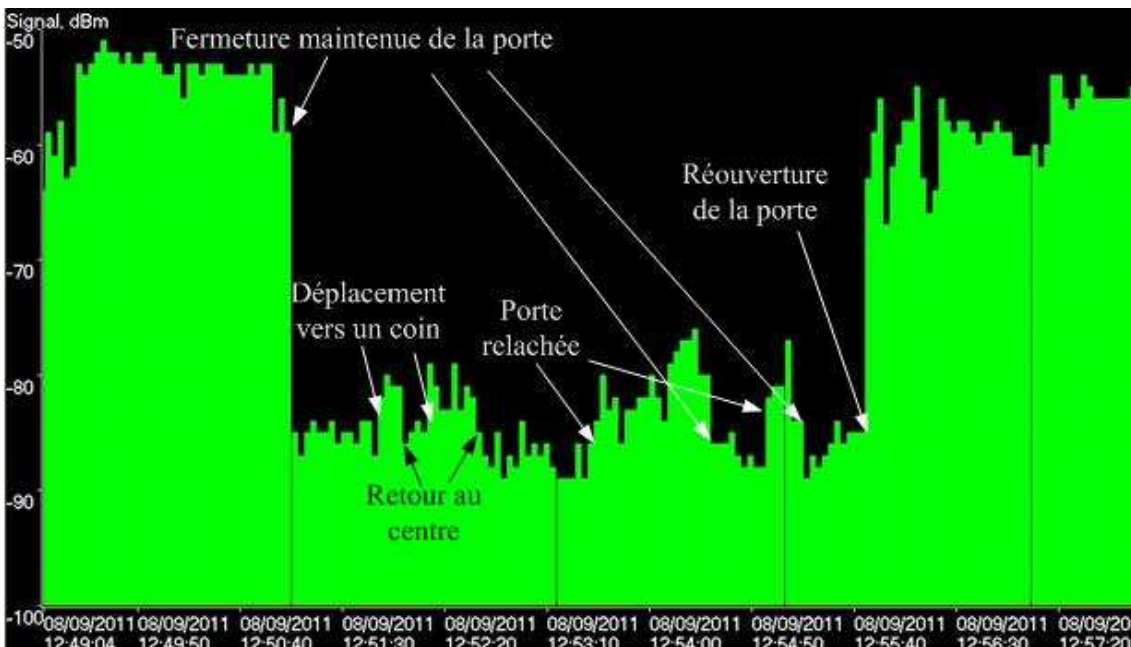


Figure 135 : Relevé du niveau de signal reçu dans le sauna à l'aide de Network Stumbler.

Conscient du fait que si des fuites existent, elles se produisent aux jonctions entre les faces du sauna, nous approchons le récepteur WiFi au plus près d'un des coins. Nous observons alors une augmentation du signal reçu d'environ 3 à 4dB soit une

atténuation de 26 à 27dB. Nous reproduisons l'essai sur le coin opposé. Une augmentation inférieure à 1 ou 2dB est perçue cette fois-ci.

Nous entrebâillons ensuite la porte de quelques centimètres (porte relâchée sur la figure 135). Nous observons alors une hausse du signal de 3 à 8dB. Ce résultat est bon car il montre qu'une légère ouverture ne détruit pas complètement les effets de la mise en place du métapapier. Nous refaisons cette manipulation une deuxième fois pour s'assurer de la répétabilité des résultats

En dernier lieu, nous ouvrons en grand la porte et observons alors un retour au niveau initial de -55dBm.

VI.7 Conclusions et perspectives

Dans cette partie, nous avons pu étudier l'impact sur les performances des SSF d'une impression en encre conductrice avec des papiers commerciaux.

Des mesures effectuées sur des essais industriels de grandes tailles ont montré qu'une atténuation légèrement supérieure à 20dB pouvait être atteinte. Nous avons pu aussi constater que le procédé industriel permettait de transférer plus d'encre que le procédé laboratoire et que l'utilisation d'un anilox de plus faible volume s'avère être une meilleure option. Nous avons aussi rejeté la possibilité d'imprimer sur un papier non couché.

La deuxième partie de ce chapitre avait pour objectif de démontrer l'impact de l'environnement proche du métapapier. Il en ressort qu'il peut être utilisé comme n'importe quel papier-peint de sous-couche avec n'importe quelle colle, n'importe quelle plaque de plâtre ou de bois. De plus, il peut être recouvert de n'importe quel papier-peint. Le tout sans perte importante d'efficacité.

Enfin, une mesure dans des conditions quasi-réelles a montré une atténuation de 30dB pour des signaux WiFi provoquée par l'installation de métapapier.

Conclusion générale et perspectives

Contributions

Le travail présenté a été divisé en 6 parties principales. Nous avons, dans un premier temps, présenté différentes technologies permettant de contrôler et de filtrer les OEM. Nous avons conclu cette première partie en faisant le choix des surfaces sélectives en fréquence comme technologie à utiliser pour la création de filtres spatiaux sur papier.

Dans une deuxième partie, après un rapide état de l'art de l'électronique imprimée, nous avons décrit les technologies d'impression industrielles couramment utilisées dans ce milieu. Nous avons ainsi pu voir que la technologie la plus adaptée aux ressources financières dont nous disposions et à nos besoins était la technologie flexographique. Nous avons ensuite conclu cette partie en donnant quelques précisions sur le substrat papier et notamment ses caractéristiques électromagnétiques.

Dans une troisième partie, nous avons cherché un motif de surface sélective en fréquence répondant à notre problématique. Nous avons, dans un premier temps, défini le cahier des charges de ce dernier, montrant qu'une atténuation de 20dB devait être atteinte, qu'il fallait une insensibilité à l'angle d'incidence de l'onde jusqu'à 70°, minimum, et, que les fréquences visées étaient nombreuses. Nous avons séparé notre application en deux catégories : WiFi et GSM. Cela afin de trouver un motif répondant au cahier des charges plus simplement.

Nous avons ensuite fait un état de l'art des motifs existants afin de montrer qu'aucun ne répond à l'ensemble des spécifications. Pour cela, nous avons simulé le fonctionnement de chacun d'entre eux à l'aide de CST Microwave. Nous avons ensuite tenté plusieurs voies pour la création d'un nouveau motif : algorithme génétique, intégration d'un motif dans un autre, modification d'un motif existant. La possibilité d'en créer un en modifiant le design d'un motif existant a d'ailleurs porté ses fruits. Ainsi, un motif plus performant vis-à-vis des attentes a été créé. Pour conclure cette partie, trois motifs ont été sélectionnés : un pour le WiFi et deux pour le GSM.

Dans la quatrième partie, nous avons cherché, en premier lieu, à mettre en place un dispositif de mesure pour vérifier que l'efficacité des motifs prédite par les

simulations était bonne. Nous nous sommes alors intéressés rapidement à des technologies de mesure peu utilisées mais qui présentent certains avantages avant de conclure qu'aucunes ne peut être utilisées dans le cas présent. Nous avons ensuite décrit le banc de test utilisé et la procédure de test employée, en insistant sur les limitations qu'il présente. Nous avons ainsi pu voir qu'à basse fréquence, pour la bande 0.9GHz notamment il y a une limitation de la dynamique de mesure. Que ce soit en chambre anéchoïque ou non. Nous avons cependant conclu que pour le test d'échantillons avec motifs WiFi, ces limitations n'étaient pas problématiques. C'est ce motif qui a été principalement utilisé pour toute la suite des travaux.

Puis, toujours dans cette partie, nous avons mesuré l'efficacité de filtrage des nouveaux motifs ainsi que d'un motif concurrent tous réalisés sur époxy pour comparaison. Nous avons ainsi pu conclure sur la validité des simulations et du banc de test.

Ensuite, dans une cinquième partie, nous avons commencé par vérifier la faisabilité d'une impression flexographique d'encre conductrice sur certains papiers. Pour cela, nous avons utilisé une machine d'impression laboratoire, celle du CTP à Douai, et, après description des supports, de l'encre et des clichés utilisés, nous avons donné quelques conclusions sur les possibilités d'impression. Nous avons ainsi vu que la résolution atteignable était de $50\mu\text{m}$ pour la largeur de ligne et de $250\mu\text{m}$ pour l'espacement entre lignes, que la conductivité pourrait atteindre 5.10^5S/m et que les supports d'impression devaient être du papier couché.

Après un rapide résumé de cette petite étude de faisabilité, nous avons ensuite décrit les essais industriels réalisés dans ce projet. Ils visaient à des impressions plus larges et plus longues dans des conditions réelles. Après la description des quatre essais réalisés, des résultats préliminaires sur la qualité d'impression ont été donnés avant de conclure cette partie. Nous avons ainsi pu voir qu'une impression en deux passes n'était pas possible, confirmer que l'impression sur un papier non couché n'était pas envisageable et, qu'un trop gros volume d'encre déposé en une fois pouvait conduire à des défauts importants dans l'impression.

Enfin, dans la sixième et dernière partie, nous avons ensuite utilisé les papiers imprimés pour tester l'efficacité de notre papier-peint filtrant les ondes. Nous avons ainsi pu mesurer l'efficacité de filtrage d'échantillons fabriqués à partir des bandelettes

imprimées au CTP. Au préalable, nous avons étudié l'impact d'utiliser des bandelettes au lieu d'échantillons complets grâce à des bandelettes d'époxy. Nous avons ainsi pu constater qu'un positionnement particulier devait être respecté mais que cette mesure était possible. Avec les bandelettes de papier, une atténuation de 20dB a quasiment été atteinte. Seuls certains défauts d'impression ou d'assemblage des échantillons nous ont empêché d'atteindre ce niveau. Nous avons aussi vu que les paramètres d'impression pouvaient avoir un très fort impact sur l'efficacité de filtrage. Le volume de l'anilox utilisé et la pression appliquée doivent permettre une dépose de l'encre régulière, sans manquement. Le compromis devrait être qu'une pression importante soit appliquée et qu'un anilox de « faible » volume soit employé comme 13 ou 16cm³/m². Les mesures des échantillons issus des essais industriels ont ensuite confirmé les résultats préliminaires obtenus dans la cinquième partie ainsi que le compromis établi.

Nous avons ensuite vérifié que le métapapier pourrait être utilisé comme papier-peint standard ou, du moins, comme papier-peint de sous-couche. Pour cela, nous avons procédé étape par étape sur plusieurs échantillons : métapapier scotché sur du plâtre, métapapier collé sur du plâtre avec de la colle à tapisserie, papier-peint collé sur le métapapier, lui-même collé sur du plâtre. L'opération a été répétée dans le cas de l'utilisation d'une sous couche sur le plâtre, de l'utilisation de bois à la place du plâtre, d'autres colles et de différents papiers-peints. A chaque fois, nous avons constaté le même comportement. Nous avons vu que le métapapier pouvait être utilisé sans problèmes dans tous les cas cités. L'atténuation provoquée peut avoisiner les 22.5dB prévus par la simulation dans le cas de l'utilisation d'échantillons issus des essais industriels. Un démonstrateur a aussi été fabriqué à l'aide d'un sauna. Nous avons mesuré une atténuation d'un signal WiFi de l'ordre de 25dB.

Enfin, nous avons terminé en étudiant succinctement et sommairement l'installation réelle du métapapier dans un immeuble avec notamment la gestion des fenêtres, portes, sols et plafonds. Cela nous a permis de constater que dans tous les cas, aucune limitation importante n'existait quant à son utilisation en environnement réel.

Perspectives

De nombreuses perspectives découlent de ces travaux. En effet, dans le premier chapitre il a été fait mention de la possibilité de développer une plaque de plâtre qui

absorbe les ondes basée sur le principe de l'écran de Salisbury. Des travaux pourraient donc être entrepris afin d'étudier la faisabilité de cette idée. Il serait aussi intéressant d'étudier l'impact d'une absorption au lieu d'une réflexion sur les différents aspects techniques que nous cherchons à améliorer.

Dans le deuxième chapitre nous faisons le choix d'utiliser la technologie flexographique. Cependant, comme nous l'avons vu, en fonction des quantités de métapapier qui seront produites l'utilisation de l'héliographie peut s'avérer plus intéressante. Il pourrait donc être intéressant de lancer une étude de faisabilité.

Le nombre de papier testé a été restreint en raison des coûts de prototypage. Cependant, certaines références de papier non tissé semblent répondre aux spécifications, tout en diminuant encore les coûts de production. Malheureusement, en raison de ses propriétés physiques, ce support a tendance à coller au cliché empêchant ainsi la phase de prototypage au CTP où l'impression se fait feuille à feuille. Il serait donc bon de lancer un essai industriel sur ce support, où le papier est tendu et ne peut donc rester attaché au cliché, afin de confirmer la possibilité d'utiliser ce papier.

Dans le troisième chapitre, l'utilisation d'algorithme génétique, bien que prometteuse, a été abandonnée en raison de limitations informatiques entre autres. Ces limitations diminuant rapidement dans le temps il serait intéressant de tester cette technique pour un grand nombre de pixels de petites tailles dans un avenir proche. Il pourrait ainsi être possible d'élaborer un seul motif utilisable à la fois en WiFi et GSM ou, du moins, l'ensemble des bandes de la quatrième génération des téléphones portables.

Concernant le quatrième chapitre et le banc de test, certaines améliorations pourraient être apportées afin d'augmenter sa dynamique. Par exemple, l'utilisation de joints conducteurs à l'interface échantillon/banc pourrait permettre de limiter un grand nombre de fuites. Il conviendrait aussi d'étudier plus en détails le banc utilisé afin de mieux comprendre la raison physique des limitations rencontrées et d'être ainsi capable d'en identifier les répercussions sur les mesures.

Dans l'avant-dernier chapitre, nous avons pu comprendre que l'encre utilisée, bien qu'adaptée au papier, pourrait être remplacée par une autre avec une conductivité plus importante. Il pourrait donc être intéressant de faire une étude comparative avec une autre encre du commerce ou en développement.

Dans le dernier chapitre, de nombreuses autres perspectives ont vu le jour. La première d'entre elles, et non des moindres, est d'étudier à l'aide d'un logiciel de simulation, basé sur la théorie du lancé de rayon, l'impact de l'installation du métapapier. Cette étude permettra de visualiser les effets sur les interférences entre réseaux WiFi, sur le niveau de champ ambiant dans une pièce protégée par rapport à une pièce non protégée, etc. Elle devrait aussi confirmer le fait qu'il n'est pas essentiel de protéger le sol et le plafond.

Une autre étude serait de vérifier la faisabilité d'une impression sur du papier décor présent dans bon nombre de produits de l'habitation : porte, linoléum, parquet, etc. Comme ils subissent des traitements chimiques et/ou thermiques complexes, il faudrait donc vérifier si, industriellement parlant, cette possibilité existe belle et bien.

Une autre étude intéressante serait de vérifier le comportement des motifs GSM imprimés sur papier. Pour cela, une impression au CTP ne suffit pas étant donné les formats mis en jeu, et des impressions industrielles devront être utilisées.

Enfin, il serait bon de reproduire l'expérience faite dans le sauna à plus grande échelle. Pour cela, une seconde production de métapapier avec de plus grand volume doit être envisagée. Il serait bon aussi, afin d'augmenter l'aspect démonstratif de la chose, de sélectionner la pièce dans laquelle ce métapapier sera appliqué. En effet, le meilleur choix possible serait celui d'une pièce dans lequel de nombreux réseaux WiFi sont disponibles, en plus d'un dont la source se situe dans la pièce. Il faudrait aussi que cette pièce dispose d'une « jumelle » à proximité afin de comparer les effets. Ainsi, une fois la protection mise en place, nous serions à même de visualiser quels sont les réseaux qui ne sont plus du tout disponibles, quels sont ceux simplement affaiblis et, quel est l'effet sur l'amélioration du service disponible dans la pièce. De même pour une utilisation aux fréquences GSM, la pièce sélectionnée devrait se trouver à une distance suffisante d'une antenne relais afin de garantir un impact fort sur le fonctionnement d'un téléphone portable.

Bibliographie

- [1] A. Motevasselian et B. Jonsson, "A partially transparent Jaumann absorber applied to an aircraft wing profile," in *Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI), 2010 IEEE*, p. 1-4, 2010.
- [2] B. Chambers et A. Tennant, "Active Dallenbach radar absorber," in *Antennas and Propagation Society International Symposium 2006, IEEE*, p. 381-384, 2006.
- [3] G. I. Kiani, A. R. Weily, et K. P. Esselle, "A novel absorb/transmit FSS for secure indoor wireless networks with reduced multipath fading," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 16, n^o. 6, p. 378-380, Juin. 2006.
- [4] N. I. Landy, S. Sajuyigbe, J. J. Mock, D. R. Smith, et W. J. Padilla, "Perfect Metamaterial Absorber," *Physical Review Letters*, vol. 100, n^o. 20, p. 207402, Mai. 2008.
- [5] P. Ferrand, "Solutions de filtrage millimétrique et submillimétrique à structures périodiques en technologies innovantes," Thèse, Université de Limoges, 2005.
- [6] J. P. Vigneron et al., "Correlated diffraction and fluorescence in the backscattering iridescence of the male butterfly *Troides magellanus* (Papilionidae)," *Physical Review. E, Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*, vol. 78, n^o. 2, p. 021903, 2008.
- [7] "site de la Gemmologie à Nantes," <http://www.gemnant.es.fr/> .
- [8] N. C. Karmakar et M. N. Mollah, *Potential applications of PBG engineered structures in microwave engineering. Part I*, vol. 47. Dedham, MA, ETATS-UNIS: Horizon House, 2004.
- [9] N. C. Karmakar et M. N. Mollah, *Potential applications of FBG engineered structures in microwave engineering: Part II*, vol. 47. Dedham, MA, Etat-Unis: Horizon House, 2004.
- [10] C. Kittel, *Physique de l'état solide : Cours et problèmes*, 8 éd. Dunod, 2006.
- [11] J. D. Joannopoulos, S. G. Johnson, et J. N. Winn, *Photonic crystals*. Princeton University Press, 2008.
- [12] S. G. Johnson et J. D. Joannopoulos, "Introduction to Photonic Crystals: Bloch's Theorem, Band Diagrams, and Gaps (But No Defects)," MIT, 2003.
- [13] N. Boibouvier, "Application des matériaux à bande interdite photonique (BIP) pour la conception d'antennes et dispositifs associés destinés aux réseaux domestique sans fils," Thèse, 2004.
- [14] A. Ourir, "Applications de matériaux à bandes interdites photoniques et de métamatériaux en télécommunications," Thèse, Université Paris Sud XI Faculté

- des Sciences d'Orsay, 2006.
- [15] P. Goldsmith, *Quasioptical Systems(Gaussian Beam Quasioptical Propagation and Applications)*, Marian Ed. Wiley-IEEE Press Home, 1998.
- [16] "Conservation de la charge électrique," http://fr.wikipedia.org/wiki/Conservation_de_la_charge_%C3%A9lectrique.
- [17] A. R. Djordjević, R. M. Biljić, V. D. Likar-smiljanić, et T. K. Sarkar, "Wideband frequency-domain characterization of FR-4 and time-domain causality," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 43, p. 662--667.
- [18] H. Alamil, S. Tedjini, et P. Borel, "On the measurement of dielectric parameters for paper substrates for rfid application," Stage, CTP, 2008.
- [19] F. Sagnard et G. EL ZEIN, "Caractérisation de matériaux en ultra large bande," in *Ecole d'automne "ultra-large bande"*, 2006.
- [20] W. Robert, "Reflection and Transmission Losses Through Common Building Materials," Magis Networks, Inc, 2002.
- [21] B. A. Munk, *Frequency selective surfaces*. Wiley New York etc., 2000.
- [22] D. H. Kim et J. I. Choi, "Design of a multiband frequency selective surface," *ETRI journal*, vol. 28, n°. 4, p. 506–508, Aoû. 2006.
- [23] D. Kim, J. Choi, B. Kim, D. Sim, et J. Ko, "Frequency selective surface for the filtering of frequency band and design method thereof," U.S. Patent WO/2006/09858721-Sep-2006.
- [24] K. Toshio, K. Kashihara, K. Hosotani, et S. Sakai, "Radio wave shielding body," U.S. Patent EP1853103A107-Nov-2007.
- [25] "<http://www.idtechex.com/>."
- [26] T. Jackson, "Organic thin film transistors," in *Lasers and Electro-Optics Society Annual Meeting, 1997. LEOS '97 10th Annual Meeting. Conference Proceedings., IEEE*, vol. 1, p. 368 vol.1, 1997.
- [27] S. Goettling, B. Diehm, et N. Fruehauf, "Active Matrix OTFT Display With Anodized Gate Dielectric," *Display Technology, Journal of*, vol. 4, n°. 3, p. 300-303, 2008.
- [28] L. Shang et al., "Low-Voltage Multilevel Memory Based on Organic Thin-Film Transistor," *Electron Device Letters, IEEE*, n°. 99, p. 1-3, 2011.
- [29] H. Marien, M. Steyaert, N. van Aerle, et P. Heremans, "A mixed-signal organic 1kHz comparator with low VT sensitivity on flexible plastic substrate," in *ESSCIRC, 2009. ESSCIRC '09. Proceedings of*, p. 120-123, 2009.
- [30] Y. Amin, S. Prokkola, Botao Shao, J. Hallstedt, H. Tenhunen, et Li-Rong Zheng, "Inkjet printed paper based quadrate bowtie antennas for UHF RFID tags," in

-
- Advanced Communication Technology, 2009. ICACT 2009. 11th International Conference on*, vol. 01, p. 109-112, 2009.
- [31] C. Sriprachuabwong, C. Srichan, T. Lomas, et A. Tuantranont, "Simple RC low pass filter circuit fabricated by unmodified desktop inkjet printer," in *Electrical Engineering/Electronics Computer Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), 2010 International Conference on*, p. 929-932, 2010.
- [32] S. Min Cho, "Full Vacuum-free Fabrication of Large-area Polymer OLEDs for Signage and Lighting Applications," 2010.
- [33] L. Van Langenhove et L. Rambausek, "Smart and electronic textiles," presented at the LOPE-C, 2010.
- [34] C. Querner, "Synthèse et caractérisation de matériaux hybrides organiques-inorganiques à base d'architectures pi-conjuguées et de nanocristaux de semi-conducteurs II-VI," Thèse, Université Joseph Fourier, 2005.
- [35] C. K. Chiang et al., "Electrical Conductivity in Doped Polyacetylene," *Physical Review Letters*, vol. 39, n°. 17, p. 1098, Oct. 1977.
- [36] H. E. Katz, "Recent Advances in Semiconductor Performance and Printing Processes for Organic Transistor-Based Electronics," *Chemistry of Materials*, vol. 16, n°. 23, p. 4748-4756, Nov. 2004.
- [37] E. Cantatore et E. Meijer, "Transistor operation and circuit performance in organic electronics," in *Solid-State Circuits Conference, 2003. ESSCIRC '03. Proceedings of the 29th European*, p. 29-36, 2003.
- [38] M. Barret, "Impression par jet de matière de transistors organiques sur support souple," Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, 2007.
- [39] L. Yang et M. M. Tentzeris, "Design and characterization of novel paper-based inkjet-printed RFID and microwave structures for telecommunication and sensing applications," p. 1633-1636, 2007.
- [40] L. Yang, A. Rida, R. Vyas, et M. M. Tentzeris, "RFID Tag and RF Structures on a Paper Substrate Using Inkjet-Printing Technology," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 55, n°. 12, p. 2894, Déc. 2007.
- [41] A. Rida, L. Yang, R. Vyas, S. Basat, S. Bhattacharya, et M. M. Tentzeris, "Novel Manufacturing Processes for Ultra-Low-Cost Paper-Based RFID Tags with Enhanced" Wireless Intelligence," p. 773-776, 2007.
- [42] F. C. Krebs, "Fabrication and processing of polymer solar cells: A review of printing and coating techniques," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 93, n°. 4, p. 394-412, Avr. 2009.
- [43] M. Terry et al., "All screen-printed 18% homogeneous emitter solar cells using high volume manufacturing equipment," in *Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 2010 35th IEEE*, p. 003618-003622, 2010.

-
- [44] M. Dragoman, E. Flahaut, D. Dragoman, M. A. Ahmad, et R. Plana, "Writing Electronic Devices on Paper with Carbon Nanotube Ink," *0901.0362*, Jan. 2009.
- [45] N. Izard, "Nanotubes de Carbone : Systèmes pour la limitation optique," Université Montpellier II, 2004.
- [46] P. Buffat et J. Borel, "Size effect on the melting temperature of gold particles," *Physical Review A*, vol. 13, n°. 6, p. 2287, Juin. 1976.
- [47] D. Bolon, G. Lucas, et S. Schroeter, "Radiation Curable Conductive Ink," *Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, vol. 13, n°. 2, p. 116-121, 1978.
- [48] D. Kim et J. Moon, "Highly conductive ink jet printed films of nanosilver particles for printable electronics," *Electrochemical and Solid-State Letters*, vol. 8, p. J30, Août. 2005.
- [49] A. L. Dearden, P. J. Smith, D. Y. Shin, N. Reis, B. Derby, et P. O'Brien, "A low curing temperature silver ink for use in ink-jet printing and subsequent production of conductive tracks," *Macromolecular Rapid Communications*, vol. 26, n°. 4, 2005.
- [50] Zhiqing Xin, Luhai Li, Xiaojun Tang, Wen Zhao, et Peng Du, "The research of manufacture of flexible conductive tracks at room temperature," in *Nanoelectronics Conference (INEC), 2010 3rd International*, p. 1276-1277, 2010.
- [51] "<http://www.novacentrix.com/>."
- [52] Ying Yang, Shouxu Wang, Wei He, Ke Hu, Bo He, et Yunqi Mo, "Preparation of ultra-fine copper powder and its application in manufacturing conductive lines by printed electronics technology," in *Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices, 2009. ASEM 2009. International Conference on*, p. 131-132, 2009.
- [53] K. K. B. Hon, L. Li, et I. M. Hutchings, "Direct writing technology—Advances and developments," *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, vol. 57, n°. 2, p. 601–620, 2008.
- [54] J. ELTGEN, "Techniques d'impression d'images numérisées," *Techniques de l'ingénieur*, 1992.
- [55] M. Hedges, "Aerosol Jet Printing by OPTOMECA (Neotech Services)," 2009.
- [56] A. Rida, G. Shaker, F. Nasri, T. Reynolds, S. Nikolaou, et M. Tentzeris, "Inkjet printing of dual band conformal antenna for use in wifi frequency bands," in *Radio and Wireless Symposium (RWS), 2010 IEEE*, p. 65-67, 2010.
- [57] M. Tentzeris, "Inkjet-printed paper-based RFID and nanotechnology-based ultrasensitive sensors: The "Green" ultimate solution for an ever improving life quality and safety?," in *Radio and Wireless Symposium (RWS), 2010 IEEE*, p. 120-123, 2010.

-
- [58] H. Al-Chami et E. Cretu, "Inkjet printing of microsensors," in *Mixed-Signals, Sensors, and Systems Test Workshop, 2009. IMS3TW '09. IEEE 15th International*, p. 1-6, 2009.
- [59] Sang-Ho Lee, Jun Young Hwang, Kyungtae Kang, et Heuseok Kang, "Fabrication of organic light emitting display using inkjet printing technology," in *Optomechatronic Technologies, 2009. ISOT 2009. International Symposium on*, p. 71-76, 2009.
- [60] T. Shimoda et T. Kawase, "All-polymer thin film transistor fabricated by high-resolution ink-jet printing," in *Solid-State Circuits Conference, 2004. Digest of Technical Papers. ISSCC. 2004 IEEE International*, p. 286-529 Vol.1, 2004.
- [61] T. Rivkin, C. Curtis, A. Miedaner, J. Perkins, J. Alleman, et D. Ginley, "Direct write processing for photovoltaic cells," in *Photovoltaic Specialists Conference, 2002. Conference Record of the Twenty-Ninth IEEE*, p. 1326-1329, 2002.
- [62] Yongsang Kim, Hyejung Kim, et Hoi-Jun Yoo, "Electrical Characterization of Screen-Printed Circuits on the Fabric," *Advanced Packaging, IEEE Transactions on*, vol. 33, n° 1, p. 196-205, 2010.
- [63] D. Béchevet, "Contribution au développement de tag RFID UHF et Microondes sur matériaux plastiques," Thèse, Institut National Polytechnique de Grenoble, 2005.
- [64] D. Crow, *Principles and Applications of Electrochemistry*, 4 éd. CRC Press, 1994.
- [65] M. Pudas, J. Hagberg, et S. Leppävuori, "Roller-type gravure offset printing of conductive inks for high-resolution printing on ceramic substrates," *International Journal of Electronics*, vol. 92, n° 5, p. 251, 2005.
- [66] S. Darren, "Printed Electronics and Offset Lithography," presented at the Innovative Electronics Manufacturing Seminar, 2007.
- [67] D. Southee, G. Hay, P. Evans, et D. Harrison, "Development and Characterisation of Lithographically Printed Voltaic Cells," in *Electronics Systemintegration Technology Conference, 2006. Ist*, vol. 2, p. 1286-1291, 2006.
- [68] T. C. Claypole, D. C. Bould, et D. T. Gethin, "Improving the resolution of the flexographic printing process for R2R electronics," presented at the LOPE-C, Messe Frankfurt, Germany, 2010.
- [69] J. Siden et H. E. Nilsson, "Line width limitations of flexographic-screen-and inkjet printed RFID antennas," presented at the Antennas and Propagation Society International Symposium, Honolulu, USA, p. 1745-1748, 2007.
- [70] G. Coste, "Histoire de nos métiers," <http://cerig.efpg.inpg.fr>, 2009. .
- [71] E. Rousset, "La flexographie," Grenoble INP EFPG, 2006.
- [72] G. Allen, "The Future of Flexography andLithography in Printed Electronics,"

- NanoMarkets, 2007.
- [73] P. S. A. Evans, B. Ramsey, et D. Harrison, "A comparison of the characteristics of conductive lithographic films and screen printed circuits," *CARTS EUROPE*, p. 24–24, 1997.
- [74] M. Ranlöf et R. Mannerbro, "Inkjet and Screen Printed Electrochemical Organic Electronics," *Synthetic Metals*, vol. 158, n° 13, p. 556-560, 2008.
- [75] J. Rouis et E. Rousset, "Quels enjeux autour de l'électronique imprimée ?," EFPG (Grenoble INP), 2006.
- [76] B. E. Kahn, "Organic Electronics Technology," Printed Electronics Consulting, 2006.
- [77] J. Siden, T. Olsson, A. Koptioug, et H. E. Nilsson, "Reduced amount of conductive ink with gridded printed antennas," p. 86–89, 2005.
- [78] *Opportunities in Materials for Printable Electronics: 2007 & Beyond*. Market research report from Nanomarkets, 2007.
- [79] A. Hodgson, "The role of paper in the future of printed electronics," *2nd International Workshop on Collaborating over Paper and Digital Documents CoPADD London November*, vol. 2011, p. 3-6, 2007.
- [80] H. Kempa, M. Stanel, A. C. Huebler, et B. Trnovec, "Printed electronics on paper," presented at the Organic Electronics Conference, Frankfurt/M, 2007.
- [81] M. Stanel et al., "Coated Paper for Printed Electronics," *Professional Papermaking*, vol. 1, n° 1, p. 48-51, 2009.
- [82] S. M. Bidoki, D. McGorman, D. M. Lewis, M. Clark, G. Horler, et R. E. Miles, "inkjet printing of conductive patterns on textile fabrics," *AATCC review*, vol. 5, n° 6, p. 11, 2005.
- [83] "www.schoeller.com." .
- [84] C. Aulin, M. Gällstedt, et T. Lindström, "Oxygen and oil barrier properties of microfibrillated cellulose films and coatings," *Cellulose*, vol. 17, n° 3, p. 559-574, 2010.
- [85] M. Pudas, N. Halonen, P. Granat, et J. Vähäkangas, "Gravure printing of conductive particulate polymer inks on flexible substrates," *Progress in Organic Coatings*, vol. 54, n° 4, p. 310–316, Juillet. 2005.
- [86] P. Callaghan, E. Parker, et R. Langley, "Influence of supporting dielectric layers on the transmission properties of frequency selective surfaces," *Microwaves, Antennas and Propagation, IEE Proceedings H*, vol. 138, n° 5, p. 448-454, 1991.
- [87] J. C. Batchelor, E. A. Parker, J. A. Miller, V. Sanchez-Romaguera, et S. G. Yeates, "Inkjet printing of frequency selective surfaces," *Electronics Letters*, vol. 45, n° 1, p. 7–8, 2009.

-
- [88] C. Lee et R. Langley, "Equivalent-circuit models for frequency-selective surfaces at oblique angles of incidence," *Microwaves, Antennas and Propagation, IEE Proceedings H*, vol. 132, n°. 6, p. 395-399, 1985.
- [89] G. Sung, K. Sowerby, et A. Williamson, "Equivalent circuit modelling of a frequency selective plasterboard wall," in *Antennas and Propagation Society International Symposium, 2005 IEEE*, vol. 4, p. 400-403 vol. 4A, 2005.
- [90] K. Chang, Sang il Kwak, et Young Joong Yoon, "Equivalent circuit modeling of active frequency selective surfaces," in *Radio and Wireless Symposium, 2008 IEEE*, p. 663-666, 2008.
- [91] R. Mittra, C. H. Chan, et T. Cwik, "Techniques for analyzing frequency selective surfaces-a review," *Proceedings of the IEEE*, vol. 76, n°. 12, p. 1593-1615, Déc. 1988.
- [92] S. Nosal, "Modélisation électromagnétique de structures périodiques et matériaux artificiels : Application à la conception d'un radôme passe-bande," École Centrale Paris : Laboratoire d'Énergétique Moléculaire et Macroscopique, Combustion (E.M2.C.), 2009.
- [93] V. Chinni et J. Singh, *Propagation in indoor wireless systems (Angle of incidence distribution)*. Department of Electrical and Computer Engineering, University of Auckland, Stage, 2004.
- [94] Y. Alqudah et M. Kavehrad, "MIMO characterization of indoor wireless optical link using a diffuse-transmission configuration," *Communications, IEEE Transactions on*, vol. 51, n°. 9, p. 1554-1560, 2003.
- [95] Derek C. K. Lee, "Indoor Wireless Communication System Performance Enhancement via Environmental Modification," Thèse, University of Auckland, 2007.
- [96] Wei Li, "Performance of Ultra-Wideband Transmission over 60GHz WPAN Channel," in *Wireless Pervasive Computing, 2007. ISWPC '07. 2nd International Symposium on*, 2007.
- [97] Won-Jin Lee, In-Duk Han, Jin Young Kim, et Jun Heo, "Efficient cooperative transmission for high speed WPAN system in 60GHz channels," in *Consumer Electronics (ICCE), 2010 Digest of Technical Papers International Conference on*, p. 149-150, 2010.
- [98] F. Giannetti, M. Luise, et R. Reggiannini, "Mobile and Personal Communications in the 60 GHz Band: A Survey," *Wireless Personal Communications: An International Journal*, vol. 10, p. 207-243, Jul. 1999.
- [99] E. Besson, "Voeux d'Éric BESSON à l'Agence Nationale des Fréquences," 10-Jan-2011.
- [100] J. Romeu et Y. Rahmat-Samii, "Fractal FSS: A novel dual-band frequency selective surface," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 48, n°.

- 7, p. 1097–1105, Fév. 2000.
- [101] J. P. Gianvittorio, Y. Rahmat-Samii, et J. Romeu, *Fractal FSS: Various Self-Similar Geometries Used for Dual-Band and Dual-Polarized FSS*. 2001.
- [102] W. T. Wang, P. F. Zhang, S. X. Gong, B. Lu, J. Ling, et T. T. Wan, “Compact angularly stable frequency selective surface using hexagonal fractal configurations,” *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 51, n°. 11, p. 2541-2544, 2009.
- [103] J. Zhang, Y. Yin, et J. Ma, “Frequency selective surfaces with fractal four legged elements,” *Progress In Electromagnetics Research Letters*, vol. 8, p. 1-8, 2009.
- [104] D. H. Werner et D. Lee, “Design of dual-polarised multiband frequency selective surfaces using fractal elements,” *Electronics Letters*, vol. 36, n°. 6, p. 487–488, Mar. 2000.
- [105] L. M. Araújo, R. H. C. Maniçoba, A. L. P. S. Campos, et A. G. d'Assunção, “A simple dual-band frequency selective surface,” *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 51, n°. 4, p. 942-944, 2009.
- [106] N. Behdad, “A second-order band-pass frequency selective surface using nonresonant subwavelength periodic structures,” *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 50, n°. 6, p. 1639-1643, 2008.
- [107] Xiao-Dong Hu, Xi-Lang Zhou, Lin-Sheng Wu, Liang Zhou, et Wen-Yan Yin, “A Miniaturized Dual-Band Frequency Selective Surface (FSS) With Closed Loop and Its Complementary Pattern,” *Antennas and Wireless Propagation Letters, IEEE*, vol. 8, p. 1374-1377, 2009.
- [108] R. A. Hill et B. A. Munk, “The effect of perturbing a frequency-selective surface and its relation to the design of a dual-band surface,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 44, n°. 3, p. 368–374, Mar. 1996.
- [109] P. Taylor, J. Batchelor, et E. Parker, “Dual-band FSS design using LC traps,” in *Antennas and Propagation Conference (LAPC), 2010 Loughborough*, p. 405-408, 2010.
- [110] W. Kiermeier et E. Biebl, “New dual-band Frequency Selective Surfaces for GSM frequency shielding,” in *Microwave Conference, 2007. European*, p. 222-225, 2007.
- [111] E. Michielssen, J. Sajer, et R. Mittra, “Design of multilayered FSS and waveguide filters using genetic algorithms,” in *Antennas and Propagation Society International Symposium, 1993. AP-S. Digest*, p. 1936-1939 vol.3, 1993.
- [112] R. Mittra, “Genetic algorithm: the last word for solving all of your design problems?,” in *Antennas and Propagation Society International Symposium, 1997. IEEE., 1997 Digest*, vol. 3, p. 1672-1675 vol.3, 1997.
- [113] G. Manara, A. Monorchio, et R. Mittra, “A new genetic algorithm-based

- frequency selective surface design for dual frequency applications,” in *Antennas and Propagation Society International Symposium, 1999. IEEE*, vol. 3, p. 1722-1725 vol.3, 1999.
- [114] M. Ohira, H. Deguchi, M. Tsuji, et H. Shigesawa, “Multiband single-layer frequency selective surface designed by combination of genetic algorithm and geometry-refinement technique,” *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, vol. 52, n° 11, p. 2925-2931, 2004.
- [115] A. Fallahi, M. Mishrikey, C. Hafner, et R. Vahldieck, “Efficient Procedures for the Optimization of Frequency Selective Surfaces,” *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, vol. 56, n° 5, p. 1340-1349, 2008.
- [116] J. H. Holland, *Adaptation in Natural and Artificial Systems: An Introductory Analysis with Applications to Biology, Control, and Artificial Intelligence*. A Bradford Book, 1992.
- [117] J. Johnson et V. Rahmat-Samii, “Genetic algorithms in engineering electromagnetics,” *Antennas and Propagation Magazine, IEEE*, vol. 39, n° 4, p. 7-21, 1997.
- [118] G. Bulla, A. Alvaro, et T. Vuong, “PIFA bandwidth optimization using genetic algorithm and capacitive feeding,” presented at the Wireless Information Technology and Systems (ICWITS), 2010 IEEE International Conference on, Honolulu, USA.
- [119] V. Uchoa, *Recherche de motifs innovants pour l'utilisation de filtre spatial à base de surfaces sélectives en fréquence*. IMEP-LAHC et CTP, 2010.
- [120] D. J. Kern, D. H. Werner, A. Monorchio, L. Lanuzza, et M. J. Wilhelm, “The design synthesis of multiband artificial magnetic conductors using high impedance frequency selective surfaces,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 53, n° 1, p. 8–17, 2005.
- [121] M. Ohira, H. Deguchi, M. Tsuji, et H. Shigesawa, “Multiband single-layer frequency selective surface designed by combination of genetic algorithm and geometry-refinement technique,” *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, vol. 52, n° 11, p. 2925-2931, 2004.
- [122] Ming-Yun Lv, Min-Jie Huang, Jun Huang, et Zhe Wu, “Study on the dual-band characteristic of combined element based frequency selective surfaces,” in *Antenna Technology, 2009. iWAT 2009. IEEE International Workshop on*, p. 1-4, 2009.
- [123] A. L. P. S. Campos, E. E. C. D. Oliveira, et P. H. F. Silva, “Miniaturization of frequency selective surfaces using fractal Koch curves,” *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 51, n° 8, p. 1983-1986, 2009.
- [124] A. D. Chuprin, E. A. Parker, et J. C. Batchelor, “Convolved double square: single layer FSS with close band spacings,” *Electronics Letters*, vol. 36, n° 22, p. 1830–1831, Oct. 2000.

-
- [125] B. Sanz-Izquierdo, E. Parker, J. Robertson, et J. Batchelor, "Singly and Dual Polarized Convolved Frequency Selective Structures," *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, vol. 58, n° 3, p. 690-696, 2010.
- [126] R. Holakouei, J. Nourinia, et C. Ghobadi, "A design approach for a dual-polarized, dual-band-reject frequency selective surface using a new Fractal element," *AEUE-International Journal of Electronics and Communications*, vol. 61, n° 9, p. 568-579, 2007.
- [127] J. Vardaxoglou, G. Gousetis, et A. Feresidis, "Miniaturisation schemes for metallodielectric electromagnetic bandgap structures," *Microwaves, Antennas & Propagation, IET*, vol. 1, n° 1, p. 234-239, 2007.
- [128] R. Langley et A. Drinkwater, "Improved empirical model for the Jerusalem cross," *Microwaves, Optics and Antennas, IEE Proceedings H*, vol. 129, n° 1, p. 1-6, 1982.
- [129] E. Parker et A. El Sheikh, "Convolved dipole array elements," *Electronics Letters*, vol. 27, n° 4, p. 322-323, 1991.
- [130] F. De Barros, G. Eymin Petot Tourtollet, T. Vuong, et P. Lemaitre-Auger, "Surface adaptée à filtrer une pluralité de bandes de fréquences," U.S. Patent FR 1053217.
- [131] Wang Shanshan, Jinsong Gao, et Xu Nianxi, "Transmission properties of multiband FSS based on fractal elements," in *Antennas Propagation and EM Theory (ISAPE), 2010 9th International Symposium on*, p. 925-927, 2010.
- [132] E. A. Parker, J. B. Robertson, B. Sanz-Izquierdo, et J. C. Batchelor, "Minimal size FSS for long wavelength operation," *Electronics Letters*, vol. 44, n° 6, p. 394-395, Mar. 2008.
- [133] B. Foulonneau, "Mise au point d'un laboratoire de mesure de l'indice d'affaiblissement électromagnétique en champ diffus de composants du bâtiment," Université de Limoges, 1996.
- [134] Gaudaire François, "Caractérisation de l'affaiblissement électromagnétique de composant du bâtiment," Institut National Polytechnique de Grenoble, 1997.
- [135] "MIL-STD-285, Military Standard: attenuation measurements for enclosures, electromagnetic shielding, for electronic test purposes, method of 25 June 1956."
- [136] "IEEE Standard Method for Measuring the Effectiveness of Electromagnetic Shielding Enclosures," *IEEE Std 299-1997*, 1998. .
- [137] T. W. Wieckowski et J. M. Janukiewicz, "Methods for Evaluating the Shielding Effectiveness of Textiles," *Fibres & Textiles in Eastern Europe*, vol. 14, n° 5, p. 18-22, 2006.
- [138] Perumalraj, R, Nalankilli, G, Balasaravanan, T R, Roshanraja, K, Shyamsundar, G, et Dasaradan, B S, "Electromagnetic shielding tester for conductive textile

- materials,” *NISCAIR-CSIR, India*, vol. 35, n° 4, p. 361-365, Déc. 2010.
- [139] “<http://www.ahsystems.com/catalog/SAS-571.php>.” .
- [140] G. H. H. Sung, K. W. Sowerby, M. J. Neve, et A. G. Williamson, “A Frequency-Selective Wall for Interference Reduction in Wireless Indoor Environments,” *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 48, n° 5, p. 29–37, Oct. 2006.
- [141] G. H. Sung, K. W. Sowerby, et A. G. Williamson, “The angle dependent propagation characteristics of a frequency selective surface applied to plasterboard,” Proceedings of ISAP’04, Sendai, JAPAN, 2004.
- [142] J. Unger, “Introduction à la compatibilité électromagnétique (CEM),” 2006.
- [143] *corona treatment in the printing and converting industry*. Softal Electronic.
- [144] “Textile non-tissé,” http://fr.wikipedia.org/wiki/Textile_non-tiss%C3%A9 .
- [145] A. H. Rida, “Conductive inkjet printed antennas on flexible low-cost paper-based substrates for RFID and WSN applications.” [Online]. Available: <http://smartech.gatech.edu/handle/1853/28083>. [Accessed: 29-Sep-2010].
- [146] J. Lepretre, G. Eymin-Petot-Tourtollet, et D. Chaussy, “Impression de motifs conducteurs sur substrats celluloses,” Grenoble INP Pagora et le Centre Technique du Papier, Stage, 2010.
- [147] “Tension superficielle,” http://fr.wikipedia.org/wiki/Tension_superficielle .
- [148] A. Denneulin, “Inkjet Printing of Conductive Inks for RFID Technology: Influence of Substrate, Ink and Process,” Thèse, Grenoble INP Pagora, 2010.
- [149] S. Merilampi, T. Laine-Ma, et P. Ruuskanen, “The characterization of electrically conductive silver ink patterns on flexible substrates,” *Microelectronics Reliability*, vol. 49, n° 7, p. 782-790, Juillet. 2009.
- [150] M. Hook et K. Ward, *Dielectric measurements of typical materials used in the construction of buildings and FSS structures*. OFCOM, 2004.
- [151] M. Hook et K. Ward, *Investigation of the Constraints on the Incorporation of FSS Materials within a Building*. OFCOM, 2004.
- [152] G. H. H. Sung, K. W. Sowerby, et A. G. Williamson, “Modeling a Low-Cost Frequency Selective Wall for Wireless-Friendly Indoor Environments,” *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 5, n° 1, p. 311–314, Déc. 2006.
- [153] I. Cuiñas et M. G. Sánchez, “Permittivity and Conductivity Measurements of Building Materials at 5.8 GHz and 41.5 GHz,” *Wirel. Pers. Commun.*, vol. 20, n° 1, p. 93-100, 2002.
- [154] C. M. Alabaster et J. S. Dahele, “The Microwave properties of tissue and other lossy dielectrics,” Cranfield University, College of Defence Technology; Department of Aerospace, Power and Sensors, 2004.

-
- [155] C. Mias, C. Tsakonas, et C. Oswald, "An investigation into the feasibility of designing frequency selective windows employing periodic structures," *Radiocommunications Agency Final Rep*, Mai. 2001.
- [156] C. Tsakonas et al., "Optically transparent frequency selective window for microwave applications," *Electronics Letters*, vol. 37, n°. 24, p. 1464-1466, 2001.
- [157] B. Widenberg et J. V. R. Rodríguez, *Design of energy saving windows with high transmission at 900 MHz and 1800 MHz*. Technical Report LUTEDX/(TEAT-7110)/1-14, 2002.
- [158] S. Tan, M. Tan, et H. Tan, "Multipath delay measurements and modeling for interfloor wireless communications," *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, vol. 49, n°. 4, p. 1334-1341, 2000.
- [159] Weiland, "A discretization model for the solution of Maxwell's equations for six-component fields," *Archiv Elektronik und Uebertragungstechnik*, vol. 31, p. 116-120, 1977.

Annexe A : Présentation et configuration de CST

Microwave

CST est une société fondée en 1992 mais qui sort son logiciel phare, CST Microwave, en 1998. Ce logiciel est basé sur une technique développée en 1977 par Thomas Weiland [159] puis repris dans un algorithme dénommé MAFIA (« solution of MAXwell's equation by the Finite Integration Algorithme ») par le même homme en 1983. Il s'agit alors de mettre les équations de Maxwell sous forme intégrale puis de les discrétiser à l'aide de matrice complexe.

La résolution des équations ainsi obtenues se fait dans un domaine restreint : on parle de maille de calcul. CST permet généralement de choisir entre deux types de mailles : hexaédrique ou tétraédrique. En plus de cela CST propose une technologie propre permettant une meilleure approximation des structures : le PBA (Perfect Boundary Approximation).

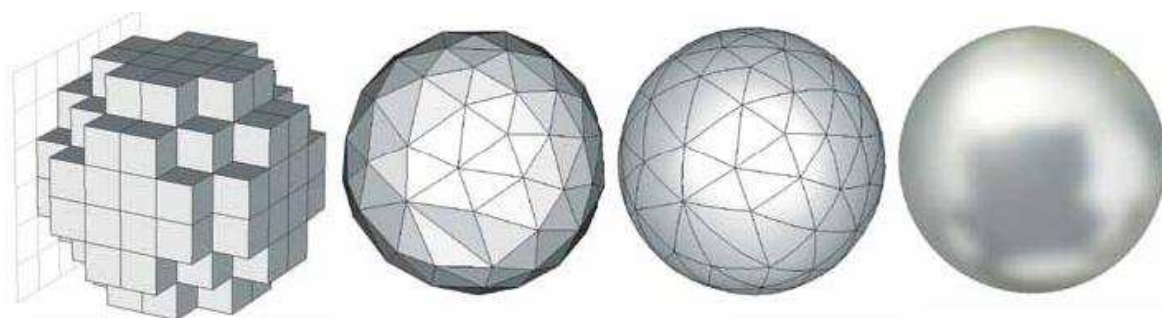


Figure 136 : Exemples de maillage. De gauche à droite : hexaédrique, tétraédrique, tétraédrique courbé, PBA

Aujourd'hui CST dispose de plusieurs solveurs différents, dont le solveur fréquentiel, que nous utiliserons car particulièrement adapté aux structures de petites tailles devant la longueur d'onde. De plus comme beaucoup d'autres simulateurs il intègre les équations de Bloch-Floquet permettant de traiter à partir d'une cellule élémentaire les problèmes périodiques comme le nôtre.

L'auteur n'ayant pas pour but de rentrer plus en détails dans le fonctionnement de CST, nous nous contenterons de porter l'attention du lecteur sur des petits points de configurations permettant de mieux comprendre les résultats obtenus, ainsi que d'être sûr de leur validité.

Tout d'abord CST comprend un Template spécifique aux surfaces sélectives en fréquence. Il permet notamment de créer deux ports dit de Floquet : Zmin en dessous de la structure et Zmax en dessus. De nombreux paramètres peuvent être réglés grâce à ces derniers :

- Polarisation de l'onde
- Angle d'incidence de l'onde
- Nombre de modes de Floquet pris en compte dans le calcul
- Distance jusqu'à la structure étudiée

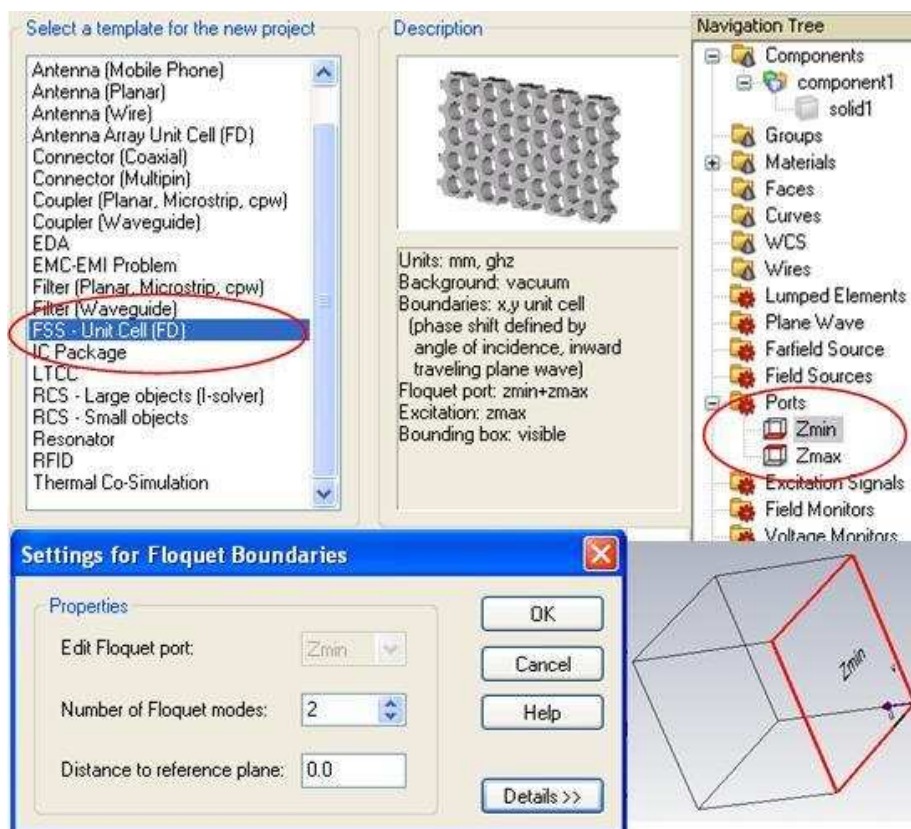


Figure 137 : Eléments de CST Microwave

Pour la polarisation de l'onde (TE et TM) le lecteur peut se référer au premier chapitre. De même pour l'angle d'incidence. Concernant les deux derniers points une explication supplémentaire est nécessaire.

En effet, comme vu sur les images ci-dessus, le calcul se fait dans une boîte dépendant de la taille de notre structure et de la distance entre les deux ports. Cette boîte de calcul peut être vue comme une cavité où des modes (évanescents ou non) peuvent résonner. Or tous les modes qui peuvent résonner dans cette structure doivent être pris

en compte dans le calcul sous peine de fausser les résultats si ce n'est pas fait. Heureusement un indicateur du nombre de modes à prendre en compte ressort rapidement durant la simulation. Il s'agit des courbes affichées dans « port information » représentant la constante d'atténuation (alpha) ou de propagation (béta) en fonction de la fréquence.

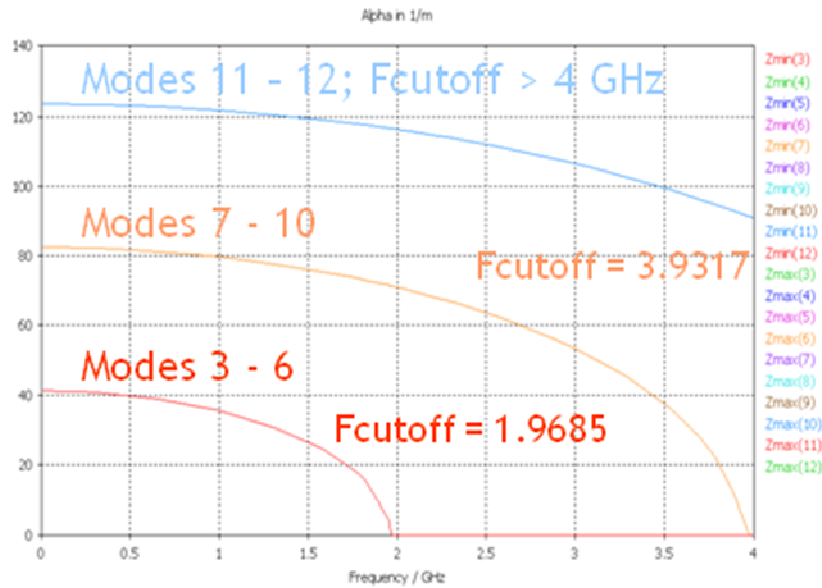


Figure 138 : Exemple de constantes d'atténuation (pour 12 modes de Floquet pris en compte) en fonction de la fréquence obtenues lors d'une simulation

Sur cet exemple, figure 138, on distingue trois groupes de modes. Les premiers modes ont une fréquence de résonance comprise dans le domaine d'étude (1.9685GHz). Il faut donc les prendre en compte dans le calcul. En effet, comme on le voit en dessous de cette fréquence, ces modes sont évanescents ($\alpha > 0$ et $\beta = 0$), mais à la fréquence de coupure une résonance à lieu et ils se mettent à se propager ($\beta > 0$ et $\alpha = 0$), d'où l'intérêt de les prendre en compte dans le calcul. Il en est de même pour le deuxième groupe de mode dont la fréquence de coupure est tout juste dans le domaine d'étude. Enfin le dernier groupe de modes présente une fréquence de coupure en dehors du domaine d'étude et il peut donc ne pas être utilisé dans le calcul.

Sans cette précaution le résultat du calcul est faux ! Il faut donc y prendre garde.

Nous savons donc comment paramétrer le nombre de modes de Floquet utilisés dans le calcul mais qu'en est-il de la distance entre un port et la structure étudiée ? Normalement ce paramètre ne devrait rien changer aux résultats, en revanche il permet de gagner en précision. En effet si l'on regarde la transmission d'énergie d'un mode

évanescents à un mode qui se propage normalement, elle devrait être nulle. Or ce n'est pas le cas pour des raisons de continuité et d'approximations. En revanche on peut s'en approcher de plus en plus à mesure où la distance entre le port et la structure étudiée augmente. Pour vérifier cela reprenons la simulation de tout à l'heure, avec nos 12 modes de Floquet, et traçons la transmission d'énergie entre un mode du premier groupe et un mode de propagation principal en fonction de la distance entre la structure étudiée et le port de calcul.

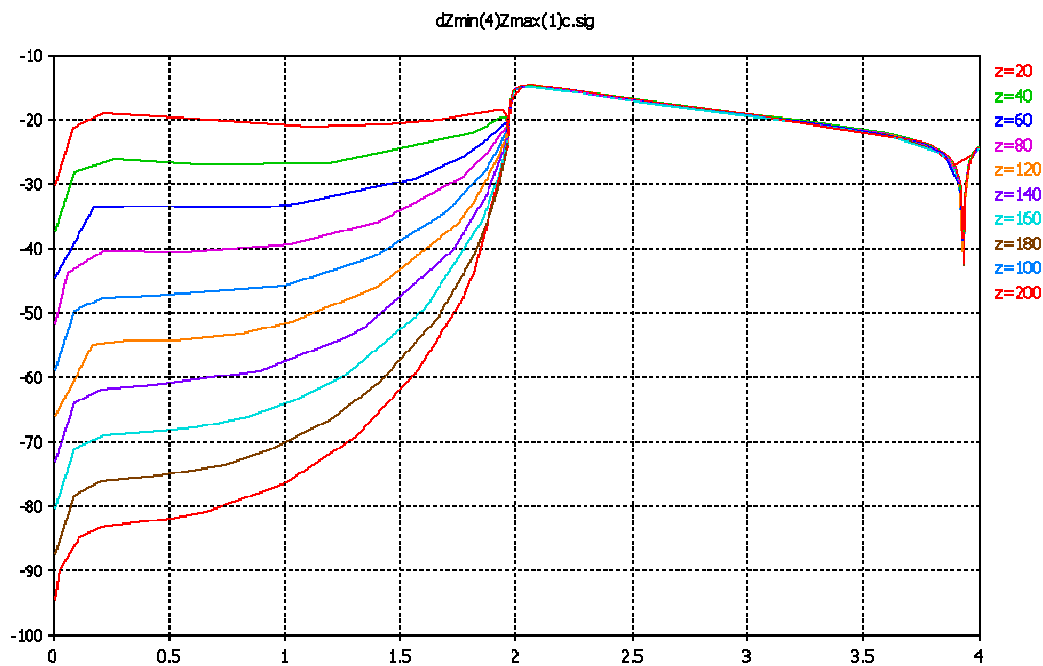


Figure 139 : Transmission de puissance du mode 4 au mode de propagation principal. Z symbolise la distance entre la structure étudiée et le port de calcul

On voit qu'effectivement plus z est grand meilleure est la précision du calcul. En revanche plus z est grand et plus le temps de calcul l'est. Un compromis doit donc être fait. Sachant que nous désirons tester un grand nombre de structure le temps de simulation est un critère important. C'est la raison pour laquelle toutes les simulations futures seront effectuées avec $z=25\text{mm}$ qui garantira un temps de calcul optimal et une précision acceptable.

Enfin un lecteur minutieux pourrait se demander ce que veut dire la notation $Z_{\min(4)Z_{\max(1)}}$ sur la figure 139 qui est l'intitulé du graphe précédent. En effet, et pour conclure cette présentation de CST, dans cette configuration les paramètres de la matrice S (permettant de présenter simplement les paramètres de transmission et

réflexion de n'importe quelle structure à n port) changent de nom. Au lieu d'appeler S_{11} le paramètre de réflexion il est ici appelé $S_{Z_{\min}Z_{\min}}$ du nom des ports utilisés. En revanche d'autres informations proviennent des ports de calculs : la polarisation et le mode. C'est donc pourquoi les courbes présentées par CST seront intitulées $S_{Z_{\min}(1)Z_{\max}(1)}$ ou $S_{Z_{\min}TE(0,0)Z_{\max}TE(0,0)}$ (en fonction de la façon dont est repéré le mode) au lieu de transmission de Z_{\max} à Z_{\min} en polarisation TE pour le mode de propagation principal.

Grâce à ces précautions et explications nous pouvons désormais utiliser CST Microwave tout en garantissant la validité des résultats ainsi que leur compréhension. Nous pouvons donc tenter de développer des nouvelles formes de motifs aux performances optimales.

Annexe B : Courbes annexes

Dans la section III.5.a, seul un résumé des courbes de fonctionnement de différents motifs est donné. La figure 140 illustre les courbes détaillées.

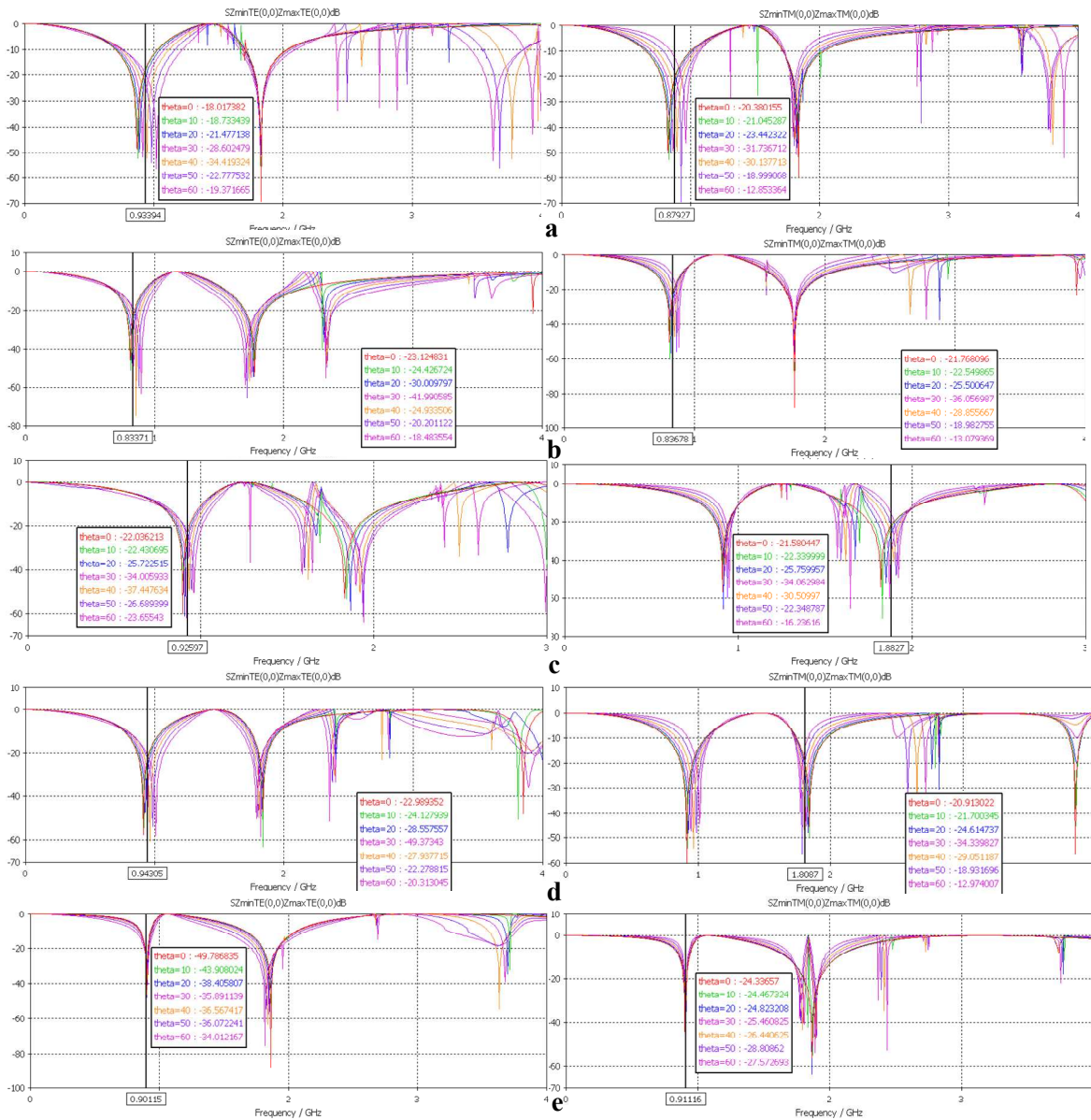


Figure 140 : Courbes obtenues par simulation illustrant les performances affichées dans le tableau 10 : a, hexagone et cercle ; b, carré et croix de Jérusalem ; c, triangle et tripôle ; d, double carré convolué ; e, croix de Jérusalem imbriquée.

On montre figure 141 et figure 142, en complément de la figure 47 et de la figure 48, les courbes de l'efficacité de filtrage du motif développé une fois un substrat d'épaisseur 1.6mm de permittivité 4.3 et de perte 0.025 ajouté. On obtient alors une insensibilité parfaite à l'angle d'incidence et ce jusqu'à 80°.

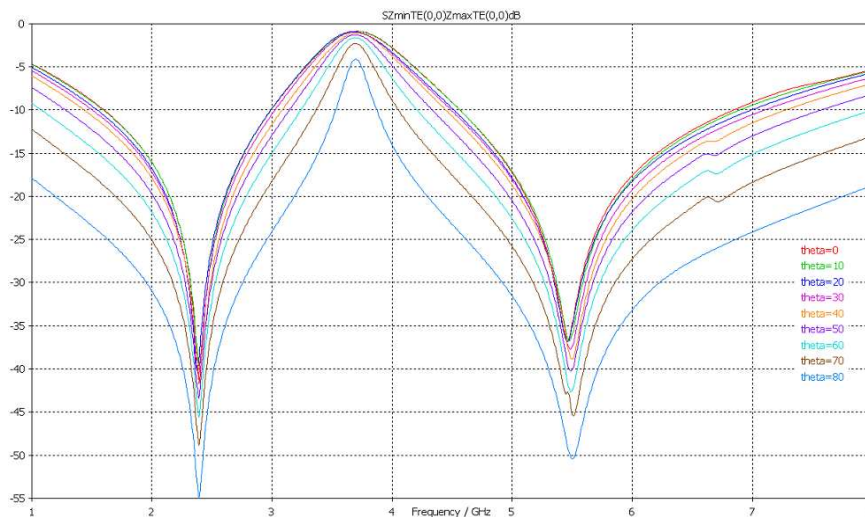


Figure 141 : Simulations TE d'un treepôle pour le WiFi avec substrat

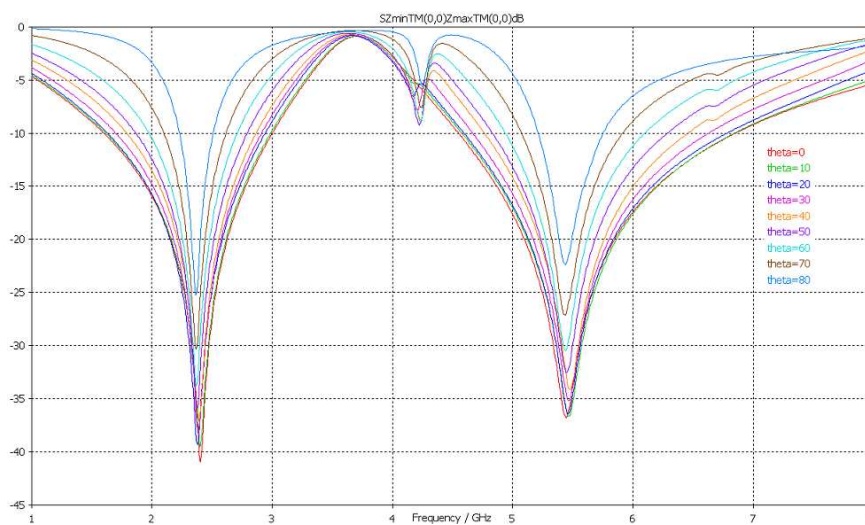


Figure 142 : Simulations TM d'un treepôle pour le WiFi avec substrat

Annexe C : Description de la mesure de résolution

Pour effectuer une mesure de résolution un motif est traditionnellement utilisé dans le monde de l'imprimerie. Il est présenté figure 143 et sa correspondance en tableau 26.

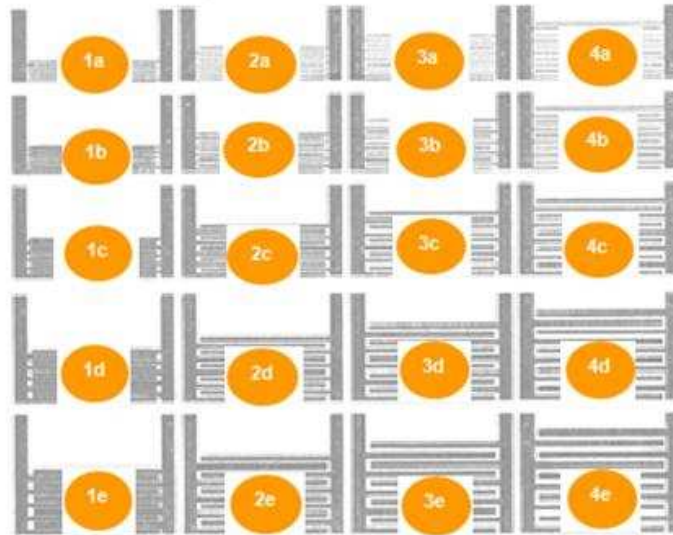


Figure 143 : Système de peignes inter-digités utilisé pour la mesure de la résolution

Tableau 26 : Correspondance du système de peignes inter-digités de la figure 143

		Espacement (μm)			
		100	200	300	400
Epaisseur (μm)	50	1a	2a	3a	4a
	100	1b	2b	3b	4b
	200	1c	2c	3c	4c
	300	1d	2d	3d	4d
	400	1e	2e	3e	4e

Habituellement ce motif est ensuite vérifié à l'œil ou avec une loupe afin de vérifier à partir de quel groupement un défaut se produit. Ce dernier pouvant apparaître sous différentes formes. Dans notre cas, la vérification se fera à l'Ohmmètre réglé en bippeur qui, lorsqu'on fera un relevé entre les deux branches principales de chaque groupement, nous indiquera si une interconnexion a lieu. Si c'est le cas c'est que l'espacement entre ligne doit être supérieur. Sinon, une vérification optique, à la loupe ou au topo3D, s'impose afin de vérifier s'il n'y a pas de rupture de continuité électrique sur chacune des branches. Cela traduirait alors le fait que la largeur de ligne imprimée doit être supérieure.

Production scientifique :

« Surface adaptée à filtrer une pluralité de bandes de fréquences », brevet (accepté) FR n°10/53217 déposée en 2010 étendu PCT, Fabien De Barros, Guy Eymin-Petot-Tourtollet, Pierre Lemaitre-Auger, Tân-Phu Vuong

Prix de l'innovation BREF Rhône-Alpes 2011 catégorie produit grand public : <http://www.trophees-innovation-bref.com/>

Palme d'argent de l'innovation à l'ATIP (association technique de l'industrie papetière) pour les travaux réalisés en 2011 : <http://www.atip.asso.fr/congres-trophees-innovation.html>

« MetaPaper – Cellulose sheets to filter electromagnetic waves », International conference: *LOPE-C*, Fabien De Barros, Guy Eymin-Petot-Tourtollet, Pierre Lemaitre-Auger, Tan-Phu Vuong

« MetaPaper: Cellulose Wallpaper for WiFi and GSM electromagnetic waves filtering », international conference: *early stage researchers workshop 2011 (EFPRO in European Paper Week)*

« Characterization of Frequency Selective Surface Spatial Filters in a Rectangular Waveguide », *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, Fabien DeBarros, Pierre Lemaître-Auger, Alysson Vasconcelos Gomes de Menezes, Romain Siragusa, Tan-Phu Vuong, Guy Eymin Petot Tourtollet, Glauco Fontgalland

« Conception, réalisation et caractérisation de papiers fonctionnels pour des applications de filtrage électromagnétique », *GDR électronique organique 2011*

« Conception, réalisation et caractérisation de papiers fonctionnels pour des applications de filtrage électromagnétique », *GDR ondes 2011*

« Création de motifs de filtrage spatial assistée par algorithme génétique », *Journées Nationales Micro-ondes 2011*, Fabien De Barros, Tan Phu Vuong, Pierre Lemaitre-Auger, Vinicius Uchoa, Guy Eymin-Petot-Tourtollet

Caractérisation expérimentale de SSF dans un guide d'ondes, *Journées Nationales Micro-ondes 2011*, Alysson Vasconcelos Gomes de Menezes, Fabien DeBarros, Romain Siragusa, Pierre Lemaître-Auger, Tan-Phu Vuong, Guy Eymin-Petot-Tourtollet, Glauco Fontgalland

Communications diverses grand public (Environnement magazine, présence magazine, Grenoble magazine, Minanews, BREF presses)