

**Thèse de doctorat
de l'Université Pierre et Marie Curie**

Spécialité : Physique

Ecole doctorale : Sciences mécaniques, acoustique et électronique de Paris

présentée par :

M. Mohamed Hicham BELYAMOUN

pour obtenir le grade de :

DOCTEUR de l'UNIVERSITÉ PIERRE ET MARIE CURIE

Modélisation et caractérisation spectrale de métamatériaux

Soutenue le 1^{er} décembre 2010 devant le jury composé de :

Directrice de thèse	M^{me} Florence OSSART , Professeur à l'UPMC
Rapporteurs	M. André NICOLET , Professeur à l'université d'Aix-Marseille M. Ari SIHVOLA , Professeur à l'université d'Aalto
Examineurs	M. Victor FOUAD HANNA , Professeur à l'UPMC M. Yohann DUVAL , Ingénieur à EADS M. Saïd ZOUHDI , Professeur à l'université Paris XI
Invités	M. Alain BOSSAVIT , Chercheur associé au LGE M. Olivier DUBRUNEAUT , Maître de conférences à l'UPMC

*A ma très chère Cécile,
A mes chers parents,
A ma chère soeur*

*"Mathematics, rightly viewed, possesses not only truth, but supreme beauty -
a beauty cold and austere, like that of sculpture." (Russel)*

Avant-Propos

*"En montant un escalier, on est toujours plus fatigué à la fin qu'au début.
Dans ces conditions, pourquoi ne pas commencer l'ascension par les dernières
marches et la terminer par la première ?" (Pierre Dac)*

Ainsi s'achèvent mes trois années de thèse au sein du LGEP. Les pages suivantes résumement un sujet passionnant, mais ne sauraient rendre compte des liens enrichissants que j'ai tissés. Je tiens à remercier ici toutes les personnes qui ont contribué à la réussite de ce travail.

Je remercie avant tout les professeurs Ari Sihvola, professeur à d'Aalto et André Nicolet, professeur à l'université d'Aix-Marseille qui ont accepté d'être rapporteurs de cette thèse. Merci à M. Victor Fouad-Hanna, professeur l'Université Pierre et Marie Curie, d'avoir présidé mon jury de thèse, et à M. Yohann Duval d'avoir participé à ce jury.

Mes sincères remerciements à ma directrice de thèse Florence Ossart, d'avoir encadré avec rigueur et détermination mes travaux de recherche et mon activité d'enseignant. Elle a su orienter ma rédaction vers un prose plus claire et une présentation pédagogique.

Je témoigne toute ma reconnaissance à Said Zouhdi et Olivier Dubrunfaut pour leur disponibilité, dynamisme et soutien dans les moments de doute. Je les remercie d'avoir rendu la collaboration entre leurs équipes respectives productive, en particulier sur un sujet aussi prometteur que les métamatériaux. Je salue leur compétence scientifique, qui aura donné le bon cap à nos travaux de recherche.

Je remercie M. Alain Bossavit, modèle de rigueur et de ténacité au travail. Nos échanges m'ont rappelé avec beaucoup de nostalgie khôlles et oraux de concours.

Ma gratitude à Christelle Pareige et Laurent Santandrea. Leurs qualités humaines et scientifiques font que notre collaboration a été des plus agréable et enrichissante.

Alexis Poizat et Michel Police, la réalisation du banc m'a permis de vous côtoyer. J'ai beaucoup apprécié cette partie de Léo grandeur nature, et vous salue pour votre motivation et expertise déterminantes. Mes remerciements en particulier à Philippe Spruyt, c'est grâce à vous que mes métamatériaux ont pris forme.

Yu, ton humour et ta bonne humeur auront marqué notre collaboration. A Cédric, mon collègue de bureau, merci d'avoir maintenu une atmosphère saine et propice au travail.

J'embrasse mes parents et ma soeur, merci pour votre confiance, disponibilité et amour, de m'avoir accompagné toutes ces années d'études, et octroyé les moyens de réaliser mes rêves.

Mes pensées les plus tendres reviennent à ma muse et partenaire. J'ai eu la chance de rencontrer en début de thèse un parangon de bonté et de sincérité. Merci Cécile, d'inspirer le meilleur en moi et d'avoir nimbé de bonheur ces années de recherche.

Table des matières

Introduction	13
I Éclatement périodique dans le domaine temporel	19
État de l'art des méthodes d'homogénéisation	21
1 Formalismes d'homogénéisation analytique	23
1.1 Lois de mélange dans le domaine fréquentiel	24
1.1.1 Formalisme de Maxwell-Garnett	24
1.1.2 Formalisme de Clausius-Mossotti	24
1.1.3 Lois de puissances	25
1.1.4 Formalisme généralisé	26
1.2 Lois de mélange dans le domaine temporel	26
1.2.1 Mélange de deux matériaux dispersifs	27
1.2.2 Modèles de polarisation	28
1.3 Conclusion	31
2 Homogénéisation par éclatement périodique	33
2.1 Position du problème	33
2.2 Opérateur d'éclatement périodique	35
2.3 Éclatement du réseau	36
2.4 Formulation variationnelle du problème homogénéisé	37
3 Simulation d'une structure périodique dispersive	41
3.1 Discrétisation temporelle	41
3.2 Discrétisation spatiale de la forme variationnelle	43
3.2.1 Méthode des éléments finis	43
3.2.2 Application au calcul des paramètres effectifs	43
3.3 Prise en compte de la périodicité	44
3.4 Conclusion	46
4 Résultats des simulations	47
4.1 Impact de la géométrie de l'inclusion	47
4.2 Effet du contraste de permittivité : cas de la neige sèche	49
4.3 Homogénéisation d'un gruyère anisotrope	49
4.4 Homogénéisation dans le domaine temporel	50
4.5 Dans le domaine fréquentiel : le mélange éthanol-eau	51
4.6 Permittivité extrinsèque négative	53
Conclusion et perspectives	55

II	Homogénéisation dans le domaine fréquentiel d'un réseau d'anneaux fendus	57
	Introduction à l'homogénéisation dynamique	59
1	Formulation théorique de la perméabilité effective	61
1.1	Position du problème	61
1.2	Homogénéisation par décomposition de Floquet-Bloch	62
1.2.1	Décomposition de Floquet-Bloch	62
1.2.2	Homogénéisation des équations de Maxwell	63
1.3	Nécessité d'un second paramètre	65
1.3.1	Formulation variationnelle du problème homogénéisé	65
1.3.2	Introduction des pertes par effet Joule	67
1.4	Formulation analytique pour les structures bidimensionnelles	68
1.5	Conclusion	69
2	Discrétisation du problème	71
2.1	Maillage du modèle	71
2.2	Simulation d'une boîte vide avec conditions périodiques	72
2.3	Prise en compte du potentiel multivoque	74
2.3.1	Problème discrétisé sans pertes	74
2.3.2	Problème discrétisé avec pertes	76
2.4	Conclusion	77
3	Simulation d'un réseau anneaux fendus	79
3.1	Structure du programme	79
3.2	Calcul de la perméabilité effective	80
3.3	Carte du champ électromagnétique	82
3.4	Influence de divers paramètres	82
3.4.1	Finesse du maillage	82
3.4.2	Dimensions de l'anneau	83
3.4.3	Propriétés électromagnétiques des matériaux utilisés	85
3.5	Simulation de structures bidimensionnelles	85
	Conclusions et perspectives	87
III	Caractérisation de métamatériaux en espace libre	89
	État de l'art des méthodes de caractérisation	91
1	Banc de caractérisation en espace libre	95
1.1	Architecture du banc	95
1.2	Dimensionnement des lentilles focalisantes	97
1.3	Étalonnage en transmission-réflexion	99
1.4	Filtrage temporel	103
1.5	Calcul des paramètres effectifs	104
1.5.1	Inversion de Nicholson-Ross-Weir (NRW)	105
1.5.2	Algorithme itératif NIST	106

2 Résultats expérimentaux des caractérisations	107
2.1 Corrections de la mesure	107
2.1.1 Nécessité de l'étalonnage	107
2.1.2 Effet du filtrage temporel	108
2.2 Calcul des paramètres constitutifs de diélectriques	109
2.2.1 Plaque de plexiglas	109
2.2.2 Plaque d'alumine	110
2.3 Mesure de métamatériaux	112
2.3.1 Surfaces à Haute Impédance à base de champignons	112
2.3.2 Réseau d'anneaux fendus	114
2.3.3 Réseau de fils métalliques	116
Conclusion et perspectives	119
Conclusion générale	123
Annexes	127
A Polarizabilité d'une sphère diélectrique	127
B Systèmes linéaires avec contraintes	129
C Coordonnées barycentriques	131
D Cornets quadri-striés	133
Table des figures	135
Liste des tableaux	139
Liste des publications	141
Bibliographie	143
	149

Introduction

Les premières études de la propagation des ondes dans les structures périodiques remontent à la fin du dix-neuvième siècle, lorsque Jagadis Chunder Bose mena la première expérience sur des matériaux chiraux dans le domaine micro-ondes [CB98]. Il faudra attendre les années trente pour qu'une théorie moderne des semi-conducteurs ravive l'intérêt pour les matériaux à bande d'énergie interdite. La fin des années soixante marque le réel commencement de l'étude moderne des structures artificielles périodiques. Outre l'introduction théorique en 1967 des métamatériaux et de leur comportement exotique par Veselago [Ves68], les premières **S**urfaces **S**électives en **F**réquence voient le jour. Ces dernières tirent leur nom de leur comportement électromagnétique : elles transmettent ou réfléchissent totalement les signaux pour certaines fréquences.

Structures à bandes interdites photoniques

La propriété de bandes interdites dans un réseau d'atomes de silicium n'est pas spécifique à ce matériau et aux autres semi-conducteurs. Il suffit que des interférences destructives apparaissent lorsqu'une onde se propage dans une structure périodique pour retrouver des bandes d'énergie interdites. La révolution électronique engendrée par l'utilisation du silicium dans la plupart des circuits électroniques pousse à reproduire des structures périodiques équivalentes en optique.

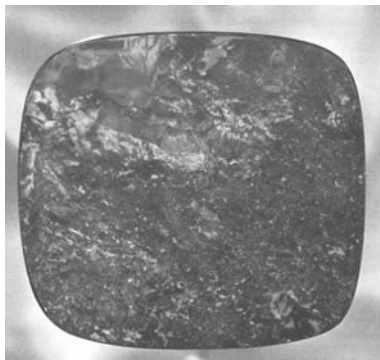


FIGURE 1 – L'opale, un cristal photonique naturel. Source¹

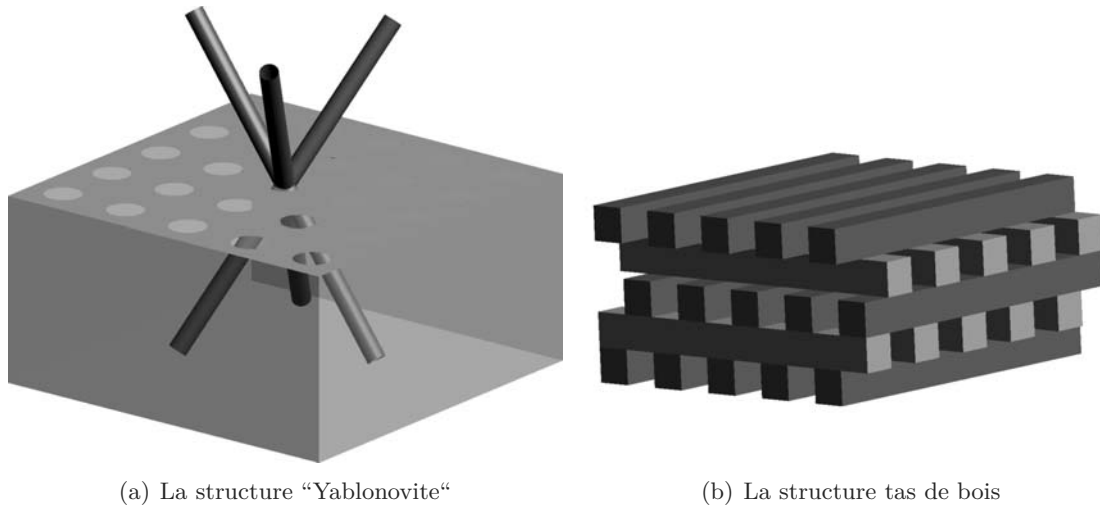
L'analogie est d'autant plus justifiée que l'équivalent de l'équation de Schrödinger dans les semi-conducteurs est une équation analogue en optique : celle de Helmholtz. La périodicité du potentiel ionique est quant à elle remplacée par une périodicité de l'indice de réfraction. Si on trouve quelques cristaux photoniques tridimensionnels dans la nature (Fig.1)¹, leur réalisation artificielle est restée inaccessible jusqu'aux années quatre-vingt avec les travaux de Yablonovitch [YGL91]. Il a imaginé des matériaux à **B**ande **I**nterdite **P**hotonique en essayant d'obtenir une première zone de Brillouin la plus proche possible d'une sphère. Les inclusions arrangées dans un schéma cristallin cubique face centrée, tels des réseaux 3D de diélectriques ou de sphères en alumine, sont les candidats idéaux car caractérisés par une zone de Brillouin octaédrique. Mal-

heureusement, la bande interdite est incomplète dans ce cas.

Le premier cristal photonique formé de billes de silicium arrangées dans une structure cristalline de diamant revient à K. Ho *et al* [HCS90]. Yablonovitch [Yab93] réussit lui aussi à produire une BIP à bande complète quelques années plus tard (Fig.2(a)). Elle consiste en du plexiglas perforé périodiquement avec trois tiges, inclinées de 35°, et séparées de 120°, et présente une bande interdite complète à 15 GHz.

Des cristaux photoniques similaires peuvent être produits en superposant des couches de silicium. Le résultat final est un réseau 3D Silicium/Air nommé "tas de bois" (Fig.2(b)). Une structure similaire à base d'AsGa a été réalisée par Noda *et al* [NTYC00] par fusion et élimination du substrat.

1. Comptoir national de l'or



(a) La structure "Yablonovite"

(b) La structure tas de bois

FIGURE 2 – Structures de Yablonovitch

Surfaces à haute impédance

Dans le domaine micro-ondes, nous évoquons plutôt des matériaux à Bande Électromagnétique Interdite. Leurs premières utilisations remontent à 1919, sur un brevet [MF19] affirmant l'intérêt de joindre à une antenne parabolique un réseau de tiges métalliques afin d'en améliorer les performances. Suivirent les surfaces sélectives en fréquences, d'abord utilisées pour réduire la surface équivalente radar avant d'être appliquées à l'amélioration d'antennes, râteaux et filtres.

Sievenpiper [Sie99, SZB⁺99] a étendu leurs applications potentielles en introduisant les surfaces électromagnétiques à haute impédance (**H**igh **I**mpedance **S**urface). Normalement, le champ électromagnétique est nul sur un conducteur électrique. La composante tangentielle du champ devant être conservée, un déphasage se produit entre l'onde incidente et réfléchie. Les HIS permettent précisément d'avoir une onde réfléchie en phase avec la source émettrice. La surface est caractérisée par une impédance équivalente qui peut devenir très élevée à certaines fréquences. La structure proposée par Sievenpiper est constituée de patches en forme d'alvéoles reliés à un plan métalliques avec des fils (ou via) (Fig.3).

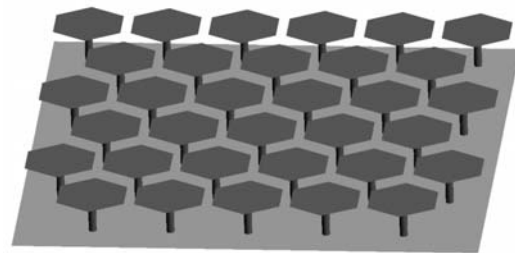


FIGURE 3 – Surface haute impédance de Sievenpiper

Les propriétés intéressantes d'une telle surface font qu'on la substitue au plan réflecteur situé sous les antennes afin d'en améliorer les propriétés. Et contrairement au plan de masse qui doit être positionné à $\lambda/4$ de l'antenne, la HIS peut y être accolée. Itoh [QYI98] a pour sa part proposé un circuit planaire constitué de cristaux compacts périodiquement disposés. Cet **U**nipolar **C**ompact **P**hotonic **B**and **G**ap peut facilement s'intégrer dans des circuits micro-ondes [CQI03].