

LICENCE 2024–2025

Mention : Physique

CMI PICS

PROJET BIBLIOGRAPHIQUE DE LICENCE 2

DES MÉTAMATÉRIAUX À L'OPTIQUE : CONCEPTS, ÉVOLUTIONS ET
APPLICATIONS

par

GRÉGORY GRZESIAK – FERDINAND

Tuteur : M. Philippe Boyer
Femto-St – Département Optique

Soutenu le 04/06/2025 devant le jury :

Hugo DAGUERRE
Philippe BOYER
Benoît NOYELLES

Enseignant chercheur INSTITUT FEMTO-ST
Maître de conférence INSTITUT FEMTO-ST
Maître de conférence INSTITUT UTINAM

Remerciements

Je tiens à remercier tout d'abord **Philippe Boyer**, mon tuteur de projet et responsable de l'UE. Pour une première prise en charge de cette unité d'enseignement, il a su faire preuve d'un accompagnement attentif et bienveillant. Ses conseils m'ont permis de mieux comprendre comment aborder un rapport bibliographique, et son introduction au sujet a été essentielle pour orienter mes recherches.

Je souhaite également remercier **Vincent Laude** et **Muamer Kadic**, chercheurs ayant pris le temps de me recommander plusieurs ouvrages et ressources utiles, contribuant ainsi à enrichir considérablement ma réflexion.

Un grand merci à **Fadi Baida**, pour avoir accepté une brève entrevue durant l'une de ses pauses méridiennes, et m'avoir aidé à clarifier certains aspects complexes du sujet.

Je n'oublie pas les personnes qui ont relu ce rapport et m'ont fait part de leurs remarques constructives : merci à **Hidéo Petament**, **Jade Rattanamongkhoun**, ainsi qu'à toutes celles et ceux qui ont pris de leur temps pour m'apporter un regard extérieur.

Enfin, je remercie l'ensemble de la formation **CMI** (Cursus Master en Ingénierie) pour le cadre stimulant qu'elle propose, et sans laquelle ce projet n'aurait pu être mené dans de telles conditions.

À toutes et tous, merci.

Table des matières

1	Introduction	4
2	Des fondements aux premières réalisations	5
2.1	Contexte historique et intuition théorique	5
2.2	Métamatériaux et structures réalisables	6
2.3	Validation expérimentale (Shelby et al., 2001)	6
2.4	Premiers usages et essor bibliographique	7
3	Nature, géométries et transition optique	8
3.1	Principes de conception des métamatériaux	8
3.2	Métamatériaux passifs vs actifs	9
3.3	Anisotropie, chiralité et réponses directionnelles	9
3.4	Typologies géométriques : 1D, 2D, 3D et quasi-cristaux	10
3.5	Transition vers l'optique : du micro-onde au visible	11
3.6	Fabrication nanométrique et contraintes techniques	11
3.7	Bilan d'étape et ouverture vers l'optique	12
4	Applications et perspectives interdisciplinaires	13
4.1	Applications concrètes des métamatériaux	13
4.2	Métamatériaux non linéaires et à gain	14
4.3	Métamatériaux topologiques et robustesse des ondes	14
4.4	Verrous technologiques et limitations fondamentales	15
4.5	Interdisciplinarité et nouveaux domaines d'application	15
5	Conclusion	17
	Résumé	20

Table des figures

2.1	Inversion du vecteur d'onde dans un matériau à indice négatif, selon Veselago (1968) [1].	5
2.2	Structure réalisée par Shelby et al. (2001), combinant SRR et fils métalliques pour obtenir un indice de réfraction négatif dans le domaine des micro-ondes [4].	6
2.3	Évolution du nombre de publications sur les métamatériaux (source : Lens.org) [7].	7
3.1	Déviation inverse des rayons lumineux dans un milieu à indice négatif, selon Pendry (2000) [2].	8
3.2	(a) Dispositif expérimental de métamatériaux planaires montrant une chiralité extrinsèque : réseau d'anneaux ouverts (SRR) illuminé selon différents angles d'incidence. (b) Vue en microscopie optique d'un SRR macroscopique utilisé à 15 mm d'échelle. (c) Cellule unitaire nanométrique (SRR inversé) utilisée dans l'infrarouge proche. Le comportement optique dépend de l'angle α entre la direction de propagation $\vec{k}$ et l'axe du motif, induisant une activité optique sans chiralité intrinsèque [11].	10
4.1	Indice de réfraction effectif mesuré dans un métamatériau 3D à base de « fishnet », démontrant un régime à indice négatif dans l'infrarouge proche (vers $1,5 \mu\text{m}$) [12].	13
4.2	Répartition des domaines d'étude associés aux métamatériaux, selon Lens.org [7].	16

Chapitre 1

Introduction

Depuis le début du XXI^e siècle, les métamatériaux occupent une place croissante dans les recherches en physique, photonique et ingénierie des ondes. Ces structures artificielles, composées d'unités périodiques sub-longueur d'onde, permettent de réaliser des propriétés électromagnétiques absentes dans les matériaux naturels. Parmi elles, la possibilité d'obtenir un indice de réfraction négatif — via une permittivité électrique ε et une perméabilité magnétique μ simultanément négatives — a ouvert un champ de recherche interdisciplinaire particulièrement actif.

L'idée d'un tel comportement remonte à l'article fondateur de VESELAGO [1], mais ce n'est qu'à partir des travaux théoriques de PENDRY [2] et SMITH et al. [3] que l'on a proposé des structures physiquement réalisables : anneaux résonants (SRR), réseaux de fils métalliques, composites périodiques. Ces dispositifs ont ensuite été validés expérimentalement par SHELBY, SMITH et SCHULTZ [4], qui ont démontré un indice de réfraction effectif négatif dans le domaine des micro-ondes. Ces résultats ont inauguré une nouvelle approche de l'optique fondée sur la structuration plutôt que sur la composition chimique du matériau.

Depuis cette démonstration, le domaine a connu une croissance exponentielle. De nombreuses avancées ont permis d'étendre ces concepts aux hautes fréquences [5], en particulier vers l'infrarouge et le visible, où les défis de fabrication, de pertes optiques, et d'homogénéisation deviennent critiques [6]. Ces enjeux ont conduit à l'apparition de métasurfaces, de structures actives, de matériaux à gain ou encore de métamatériaux non linéaires.

Aujourd'hui, les métamatériaux sont envisagés pour des applications concrètes dans l'imagerie, la détection, l'invisibilité, la photonique intégrée ou les capteurs quantiques. L'évolution de ce champ est accompagnée d'un intérêt bibliographique croissant, comme le montrent les bases de données Lens.org ou Web of Science, et d'un élargissement disciplinaire constant.

Ce mémoire propose une revue structurée de ces travaux. Nous commencerons par retracer les fondements théoriques et expérimentaux des métamatériaux à indice négatif, avant d'aborder leurs géométries, leur passage au domaine optique, et leurs contraintes de fabrication. Le troisième chapitre mettra en lumière les applications actuelles, les verrous physiques et technologiques, ainsi que les perspectives interdisciplinaires qui positionnent ces structures au carrefour de la nanophotonique, de l'électronique et des technologies émergentes.

Chapitre 2

Des fondements aux premières réalisations

2.1 Contexte historique et intuition théorique

Les propriétés électromagnétiques des matériaux sont historiquement décrites à travers deux grandeurs fondamentales : la permittivité électrique ε et la perméabilité magnétique μ . Ces paramètres définissent l'indice de réfraction effectif $n = \sqrt{\varepsilon\mu}$ ¹, qui gouverne la propagation des ondes dans le matériau. Dans la majorité des matériaux naturels, ε et μ sont positifs, ce qui restreint les effets observables à ceux prévus par l'optique classique.

En 1968, le physicien soviétique Victor Veselago envisage théoriquement un milieu où ces deux grandeurs sont négatives simultanément. Il montre que de telles conditions entraînent des effets physiques contre-intuitifs, tels que l'inversion du vecteur d'onde $\vec{k}$ par rapport au vecteur de Poynting $\vec{S}$, un renversement de la loi de Snell, et la propagation d'ondes dites « gauchères » [1].

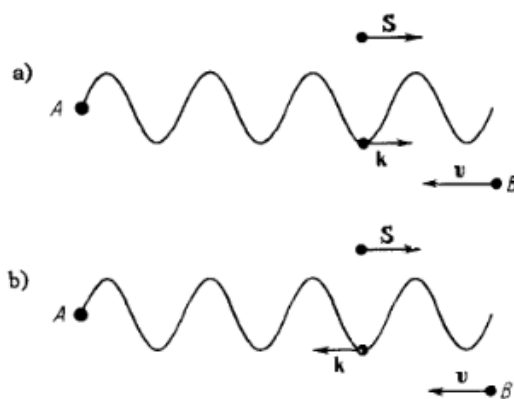


FIGURE 2.1 – Inversion du vecteur d'onde dans un matériau à indice négatif, selon Veselago (1968) [1].

Cependant, aucun matériau naturel ne satisfaisait ces conditions. L'hypothèse de Veselago restera théorique pendant plus de trente ans, faute de moyens expérimentaux pour contrôler ε et μ de manière indépendante.

1. Nous utilisons ici la forme non normalisée de la relation, où ε et μ désignent respectivement la permittivité et la perméabilité absolues du matériau, exprimées en unités SI.

2.2 Métamatériaux et structures réalisables

La situation change à la fin des années 1990 avec les travaux de Pendry et Smith. Ils proposent de concevoir des *structures artificielles périodiques*, appelées métamatériaux, constituées d'unités sub-longueur d'onde organisées de façon régulière. Ces structures ne tirent pas leurs propriétés des matériaux utilisés mais de leur géométrie. Deux composants majeurs permettent d'obtenir un indice effectif négatif :

- des **fils métalliques parallèles**, qui simulent un comportement plasmonique et conduisent à une permittivité négative $\varepsilon < 0$;
- des **anneaux fendus** (split-ring resonators, SRR), qui se comportent comme des résonateurs LC miniatures, générant une perméabilité effective $\mu < 0$ autour de leur fréquence de résonance.

En combinant ces éléments, on obtient un composite électromagnétique présentant un indice de réfraction effectif $n < 0$ dans une bande de fréquences spécifique. Cette approche ouvre une nouvelle voie pour créer des matériaux ayant des propriétés électromagnétiques absentes dans la nature [4].

2.3 Validation expérimentale (Shelby et al., 2001)

La première démonstration expérimentale d'un indice de réfraction négatif est réalisée en 2001 par Shelby, Smith et Schultz [4]. Leur dispositif combine les deux types de structures précédentes — SRR et fils métalliques — gravés sur des plaques diélectriques, ensuite empilées de manière périodique.

L'expérience repose sur la fabrication d'un prisme constitué de ce matériau composite. Lorsqu'un faisceau micro-onde le traverse, le rayon réfracté émerge du prisme avec un angle opposé à celui attendu par la loi de Snell, indiquant clairement un indice effectif négatif.

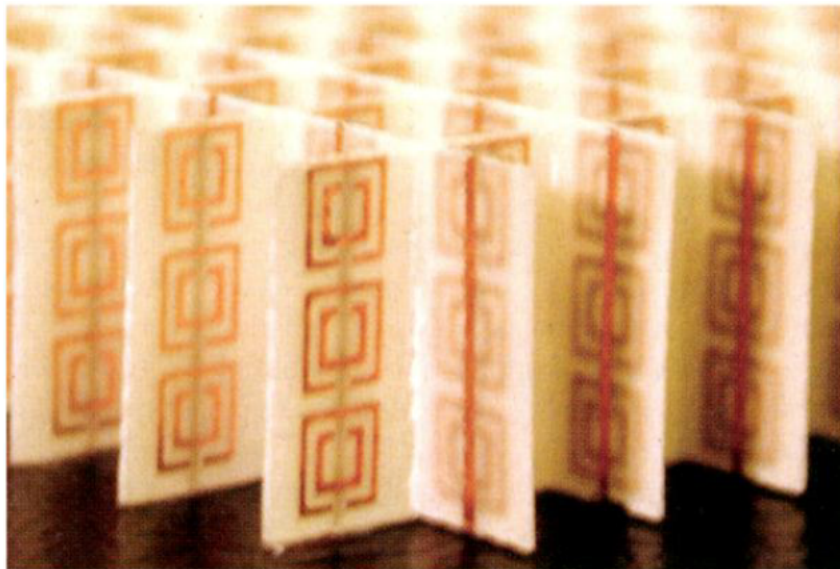


FIGURE 2.2 – Structure réalisée par Shelby et al. (2001), combinant SRR et fils métalliques pour obtenir un indice de réfraction négatif dans le domaine des micro-ondes [4].

Cette expérience fondatrice constitue la première validation expérimentale d'une hypothèse théorique formulée plus de trente ans auparavant. Elle marque le début d'un champ de recherche

interdisciplinaire et inaugure la possibilité d'ingénierie sur mesure des propriétés électromagnétiques.

2.4 Premiers usages et essor bibliographique

À la suite de la démonstration de Shelby et al., l'intérêt scientifique pour les métamatériaux croît rapidement. Ces structures ouvrent la voie à de nombreuses applications : lentilles à haute résolution, dispositifs d'invisibilité, contrôleurs de phase, filtres sélectifs, guides d'ondes miniaturisés, etc.

En parallèle, la communauté scientifique s'organise et se structure autour de cette thématique émergente. On observe une explosion du nombre de publications sur les métamatériaux dans les deux décennies qui suivent l'expérience de 2001.

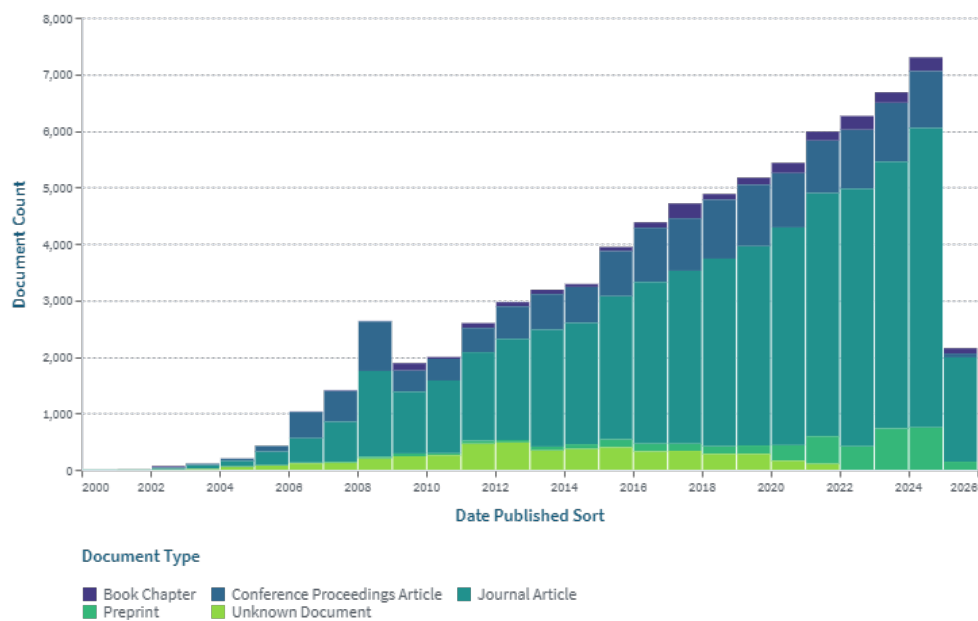


FIGURE 2.3 – Évolution du nombre de publications sur les métamatériaux (source : Lens.org) [7].

Ce développement accéléré témoigne d'un champ à fort potentiel, qui attire à la fois physiciens, ingénieurs et spécialistes de la photonique. La transition vers le domaine optique, plus complexe mais encore plus prometteuse, deviendra rapidement un enjeu central de cette recherche – sujet du chapitre suivant.

Chapitre 3

Nature, géométries et transition optique

3.1 Principes de conception des métamatériaux

Les métamatériaux sont des structures artificielles, composées d'unités élémentaires périodiques de taille inférieure à la longueur d'onde incidente. Elles ne tirent pas leurs propriétés de la nature chimique des matériaux employés, mais de leur architecture géométrique et de la résonance électromagnétique des motifs qui les composent.

Deux composants emblématiques permettent d'obtenir un indice de réfraction effectif négatif :

- des **fils métalliques parallèles** , qui simulent un comportement de type plasma. Ils présentent une permittivité effective négative $\varepsilon < 0$ dans une bande de fréquences, analogue à celle des électrons libres ;
- des **anneaux fendus** (*Split Ring Resonators*, SRR), qui se comportent comme des circuits résonants LC. Ils induisent une perméabilité effective négative $\mu < 0$ dans la bande de résonance.

La combinaison des deux structures (fils + SRR) conduit à un matériau dont les réponses électrique et magnétique sont simultanément négatives, permettant de réaliser un indice $n < 0$ sur une certaine plage spectrale. Ce principe est illustré par Pendry dans le cas d'un matériau à indice négatif, où les rayons sont déviés vers la gauche :

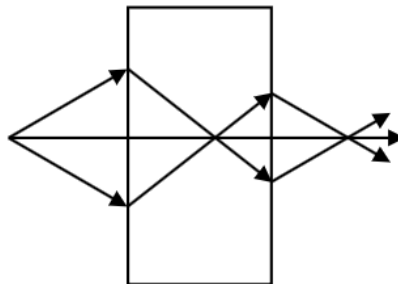


FIGURE 3.1 – Déviation inverse des rayons lumineux dans un milieu à indice négatif, selon Pendry (2000) [2].

L'intérêt fondamental des métamatériaux réside dans la possibilité de contrôler leur réponse électromagnétique par la conception de la cellule unitaire, indépendamment des matériaux de base utilisés. Ce paradigme rend possible l'ingénierie de comportements sur mesure : transparence, absorption, cloaking, amplification, anisotropie, etc.

3.2 Métamatériaux passifs vs actifs

Les premiers métamatériaux développés sont dits **passifs** : leurs propriétés dépendent exclusivement de leur géométrie fixe et des matériaux constitutifs. Ils agissent de manière linéaire, temporellement constante, et ne nécessitent aucune alimentation ou stimulation externe.

Cependant, cette limitation restreint leur champ d'application : leur réponse électromagnétique est immuable une fois la structure fabriquée. Pour dépasser ce cadre, la recherche s'oriente rapidement vers les **métamatériaux actifs**, dont les propriétés peuvent être modifiées dynamiquement par une action extérieure.

Les voies explorées incluent :

- l'intégration de matériaux à *gain* (ex. : semiconducteurs pompés optiquement) pour compenser les pertes intrinsèques ;
- l'usage de substrats à changement de phase ou à indice modulable (par champ électrique, chaleur ou lumière) ;
- la conception de structures reconfigurables (mécaniquement ou électroniquement).

Les métamatériaux actifs permettent ainsi une réponse contrôlée dans le temps : commutation, modulation de phase, filtrage accordable. Ils ouvrent la voie vers des composants fonctionnels tels que les modulateurs, les lentilles adaptatives ou les interrupteurs optiques à l'échelle nanométrique [8, 9].

Ces évolutions représentent une rupture : de simples milieux passifs, les métamatériaux deviennent des plateformes dynamiques capables d'interaction et de réponse intelligente.

3.3 Anisotropie, chiralité et réponses directionnelles

L'un des principaux intérêts des métamatériaux réside dans leur capacité à produire des réponses électromagnétiques fortement directionnelles. Cette **anisotropie** peut résulter de la géométrie de la cellule unitaire (par exemple, des motifs non symétriques), de l'empilement multicouche, ou encore de la forme du substrat. Ces effets sont particulièrement recherchés dans les métasurfaces modernes, où la propagation peut être finement contrôlée en fonction de l'incidence [8, 10].

Un phénomène particulièrement intrigant est celui de la **chiralité extrinsèque** : une activité optique peut apparaître dans des structures non chirales, uniquement en raison de l'angle d'incidence et de l'asymétrie géométrique. Plum et al. [11] ont montré qu'un réseau de SRR planaires, correctement orienté, présente une rotation du plan de polarisation significative sans que la structure elle-même ne soit chirale.

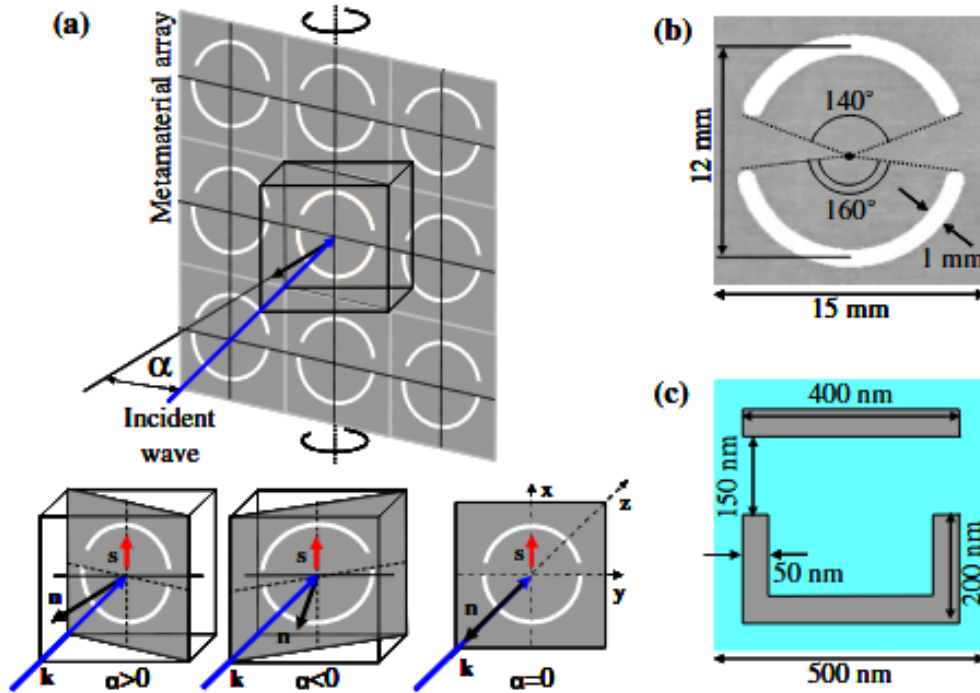


FIGURE 3.2 – (a) Dispositif expérimental de métamatériaux planaires montrant une chiralité extrinsèque : réseau d’anneaux ouverts (SRR) illuminé selon différents angles d’incidence. (b) Vue en microscopie optique d’un SRR macroscopique utilisé à 15 mm d’échelle. (c) Cellule unitaire nanométrique (SRR inversé) utilisée dans l’infrarouge proche. Le comportement optique dépend de l’angle α entre la direction de propagation $\vec{k}$ et l’axe du motif, induisant une activité optique sans chiralité intrinsèque [11].

Ces effets directionnels peuvent être exploités pour des fonctions avancées : modulateurs de polarisation, déphaseurs, ou dispositifs de sélection de spin photonique. Les revues récentes soulignent aussi leur rôle clé dans les applications optiques modernes à haut rendement [8, 10].

3.4 Typologies géométriques : 1D, 2D, 3D et quasi-cristaux

Les métamatériaux peuvent être classés selon la géométrie de leur structuration dans l’espace :

- **1D** : empilement périodique de couches minces, utilisé pour concevoir des miroirs de Bragg, filtres ou cavités résonantes. Ces structures permettent de moduler la propagation des ondes par réflexion multiple.
- **2D** : réseaux planaires (métasurfaces), constitués de motifs répétitifs déposés sur un substrat. Ils permettent de manipuler localement la phase, l’amplitude ou la polarisation des ondes lumineuses.
- **3D** : structures volumétriques, souvent complexes à fabriquer, mais permettant un contrôle complet de la propagation dans les trois dimensions. Elles sont particulièrement adaptées aux applications en micro-ondes ou THz.

Une extension originale de ces approches concerne les **quasi-cristaux** : des agencements non périodiques, mais ordonnés, inspirés de la cristallographie à symétrie interdite. Ces structures offrent de nouveaux degrés de liberté pour l’ingénierie de bandes interdites ou d’états localisés.

Chaque géométrie répond à des contraintes technologiques spécifiques (précision de fabrication, pertes, homogénéité effective), mais offre aussi des opportunités uniques selon la gamme spectrale visée [10].

3.5 Transition vers l'optique : du micro-onde au visible

Après les premières démonstrations dans le domaine des micro-ondes, un objectif central est apparu : transposer les concepts de métamatériaux dans le domaine visible. Ce changement d'échelle implique une réduction drastique des dimensions des structures, pour qu'elles restent sub-longueur d'onde jusqu'à quelques centaines de nanomètres.

Les défis sont multiples :

- **Technologique** : la fabrication de structures périodiques à l'échelle nanométrique exige des techniques de lithographie avancée et une précision extrême dans le dépôt des couches.
- **Matériaux** : aux hautes fréquences, les pertes optiques des métaux deviennent importantes, limitant la performance des résonateurs.
- **Homogénéisation** : le modèle de matériau effectif devient moins pertinent lorsque les dimensions des motifs deviennent comparables à la longueur d'onde.

Malgré ces contraintes, plusieurs travaux pionniers ont démontré la faisabilité de métamatériaux dans l'infrarouge et le visible. Valentine et al. ont proposé une structure à base de plaques perforées d'ouvertures rectangulaires, agencées de façon à produire une réponse en indice négatif à $1.5 \mu\text{m}$ [12]. Ce résultat marque une avancée importante vers des composants fonctionnels opérant à des longueurs d'onde compatibles avec les télécommunications optiques.

Ces efforts sont prolongés par des propositions de métasurfaces ultra-minces capables de manipuler la phase ou la polarisation de la lumière dans le visible, tout en minimisant les pertes [8]. La transition vers l'optique ne constitue donc pas une simple adaptation d'échelle, mais une refonte complète des principes de conception, tenant compte à la fois des effets de surface, des interactions proches, et de la réponse spectrale élargie des matériaux.

3.6 Fabrication nanométrique et contraintes techniques

La transition des métamatériaux vers le domaine optique impose des exigences de fabrication extrêmes. Les motifs sub-longueur d'onde doivent être produits avec une résolution de quelques dizaines à quelques centaines de nanomètres, tout en maintenant leur régularité et leurs propriétés fonctionnelles.

Plusieurs techniques de nanofabrication sont utilisées :

- la **lithographie électronique**, permettant de dessiner des motifs avec une précision de l'ordre de 10 nm ;
- la **lithographie optique** améliorée, adaptée aux grandes surfaces ;
- les **méthodes de dépôt en couches minces** (CVD, ALD, évaporation) pour le contrôle précis de l'épaisseur ;
- l'**auto-assemblage** ou la fabrication assistée par nanoimpression.

Outre la précision géométrique, d'autres contraintes apparaissent :

- les **pertes optiques**, particulièrement critiques dans le visible : les métaux présentent une absorption significative aux hautes fréquences. Cela a motivé l'émergence de métamatériaux à base de diélectriques à haut indice, moins dissipatifs [13] ;

- l'**hétérogénéité** des réponses locales, causée par des défauts de fabrication ou des effets de bord ;
- la **difficulté d'homogénéisation** : lorsque la taille des motifs approche celle de la longueur d'onde, l'approche par indices effectifs devient moins pertinente.

Ces limitations n'ont pas freiné les progrès récents. Des plateformes intégrées exploitent désormais les métasurfaces à l'échelle nanométrique dans des dispositifs optoélectroniques, des capteurs ou des modulateurs intégrés [8, 10]. La fabrication reste un verrou technologique majeur, mais des solutions hybrides et multi-échelle apparaissent pour contourner les limites actuelles.

3.7 Bilan d'étape et ouverture vers l'optique

Le développement des métamatériaux dans le domaine optique constitue une avancée majeure de la nanophotonique moderne. À partir d'un concept théorique contre-intuitif (indice négatif), une véritable plateforme d'ingénierie électromagnétique a émergé, exploitant la structuration à l'échelle sub-longueur d'onde.

Les défis rencontrés lors de cette transition sont considérables : miniaturisation extrême, pertes importantes dans les matériaux métalliques, difficulté d'homogénéisation, complexité des procédés de fabrication. Néanmoins, la recherche a progressivement levé ces verrous, en intégrant des approches hybrides, des matériaux alternatifs, et des métasurfaces aux performances croissantes [8, 13].

Ces avancées ont permis de concevoir des structures capables de manipuler précisément la phase, la polarisation, et la direction de la lumière. Les métamatériaux ne sont plus de simples curiosités académiques : ils deviennent des briques technologiques prometteuses pour des applications concrètes. Le domaine optique s'impose désormais comme un axe stratégique de cette dynamique, notamment dans les télécommunications, l'imagerie à haute résolution, et les composants photoniques intégrés [10].

Le chapitre suivant abordera justement ces applications concrètes, tout en élargissant la perspective vers des croisements disciplinaires inattendus.

Chapitre 4

Applications et perspectives interdisciplinaires

4.1 Applications concrètes des métamatériaux

Depuis les premières démonstrations expérimentales, les métamatériaux ont trouvé des applications dans des domaines variés, allant de l'optique à l'imagerie, en passant par la détection ou le cloaking. L'un des objectifs majeurs est l'amélioration des dispositifs optiques classiques par des structures sub-longueur d'onde.

Une première classe d'applications concerne les **lentilles à haute résolution**. En exploitant un indice de réfraction négatif, il est possible de focaliser la lumière au-delà de la limite de diffraction, selon le concept de lentille parfaite proposé par Pendry. Ce principe a été étendu à des structures tridimensionnelles. Valentine et al. ont démontré en 2008 un métamatériau 3D présentant un indice $n < 0$ dans l'infrarouge, validé par des mesures de transmission et de phase [12].

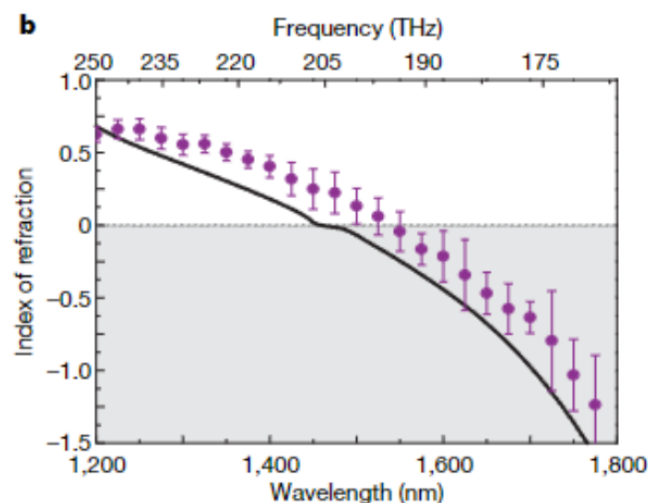


FIGURE 4.1 – Indice de réfraction effectif mesuré dans un métamatériau 3D à base de « fishnet », démontrant un régime à indice négatif dans l'infrarouge proche (vers $1,5 \mu\text{m}$) [12].

Les métamatériaux sont également exploités pour des **dispositifs de camouflage électromagnétique**. Schurig et al. ont conçu un manteau d'invisibilité basé sur la transformation du trajet des ondes, les contournant sans perturber leur phase apparente [14]. Bien que limité aux

micro-ondes dans sa première version, ce concept pose les bases d'une optique transformationnelle.

Enfin, les **capteurs optiques** bénéficient des propriétés de résonance localisée des métamatériaux : un changement de l'environnement (indice, pression, température) modifie leur réponse spectrale, permettant des mesures ultra-sensibles à l'échelle nanométrique [13, 8].

Ces applications démontrent que les métamatériaux ne sont plus de simples objets de laboratoire, mais des briques technologiques actives dans des systèmes photoniques de plus en plus intégrés.

4.2 Métamatériaux non linéaires et à gain

L'un des axes récents de développement des métamatériaux concerne leur réponse non linéaire. Dans les structures classiques, la relation entre les champs électriques et les polarisations induites est linéaire. Cependant, en introduisant des matériaux à fort coefficient non linéaire (cristaux non linéaires, couches dopées, semi-conducteurs pompés), il est possible d'obtenir des phénomènes comme la génération d'harmoniques, la modulation d'amplitude ou l'effet Kerr optique [8, 15].

Zheludev et al. ont proposé une approche expérimentale basée sur des réseaux métalliques nanostructurés présentant des résonances intenses, utilisées pour amplifier des effets non linéaires dans le visible et l'infrarouge [15]. Cette approche ouvre la voie à des dispositifs optiques ultra-compacts opérant à hautes intensités, comme les diodes tout-optique ou les convertisseurs de fréquence miniatures.

En parallèle, l'ajout de **matériaux à gain** permet de compenser les pertes intrinsèques des métamatériaux métalliques. En intégrant des milieux amplificateurs (quantum dots, polymères optiquement excités), certains dispositifs atteignent un régime de transparence effective, voire d'amplification. Cela est particulièrement prometteur pour des métasurfaces dynamiques à faible seuil de commande, capables de fonctionner en régime actif ou bistable.

Ces avancées ouvrent des perspectives vers des métamatériaux adaptatifs, capables d'évoluer en fonction du signal incident ou de leur environnement, avec des applications dans la photonique non linéaire, le traitement optique de l'information ou la détection sensible.

4.3 Métamatériaux topologiques et robustesse des ondes

Au-delà des réponses optiques classiques, les métamatériaux inspirent des approches empruntées à la physique de la matière condensée, en particulier à la topologie des états quantiques. Dans ces structures, certaines propriétés — comme l'existence d'états de bord unidirectionnels — deviennent robustes vis-à-vis des défauts ou perturbations.

Les **métamatériaux topologiques** permettent de guider la lumière, ou d'autres ondes, le long de chemins définis sans diffusion, même en présence d'imperfections de fabrication ou d'obstacles géométriques [10]. Ce type de comportement est particulièrement prometteur pour la photonique intégrée, la détection optique ou les circuits optiques reconfigurables.

Une approche consiste à imiter les effets de type Hall quantique dans des réseaux photoniques ou plasmoniques structurés. Grigorenko et al. ont montré que des nanostructures à base de graphène peuvent présenter un comportement plasmonique directionnel, en s'appuyant sur les propriétés topologiques du matériau et des géométries périodiques [9].

Les métamatériaux topologiques s'illustrent aussi dans les régimes acoustique ou élastique, où des états de bord protégés par symétrie permettent une transmission sans réflexion, même dans

des structures repliées ou asymétriques. Ce champ émergent préfigure une nouvelle génération de dispositifs où les fonctions optiques, mécaniques ou électroniques seraient protégées contre les perturbations locales.

Enfin, plusieurs travaux explorent la combinaison entre **topologie et non-linéarité**, ouvrant la voie à des dispositifs auto-adaptatifs ou reconfigurables, dans lesquels les états protégés peuvent être modifiés de manière contrôlée selon l'environnement.

4.4 Verrous technologiques et limitations fondamentales

Malgré les avancées spectaculaires des deux dernières décennies, les métamatériaux restent confrontés à plusieurs verrous limitant leur déploiement à grande échelle.

Un des principaux obstacles est lié aux **pertes intrinsèques**, en particulier dans le domaine optique. Les métaux utilisés pour produire les résonances (or, argent, aluminium) présentent une absorption significative, réduisant l'efficacité des dispositifs. Des alternatives basées sur des diélectriques à haut indice ont été proposées pour contourner ce problème [13].

La **bande passante limitée** constitue un autre défi : les métamatériaux sont souvent conçus pour une fréquence de fonctionnement étroite, et leurs propriétés ne sont pas toujours robustes face aux variations spectrales. Cela limite leur applicabilité dans des systèmes à large spectre, comme les communications optiques ou le traitement ultrarapide de l'information.

D'un point de vue théorique, la validité du modèle d'*indice effectif* est remise en question lorsque la taille des motifs devient comparable à la longueur d'onde. Des études récentes montrent que des effets non locaux, des interactions proches et des phénomènes de surface doivent être intégrés à la modélisation [8, 10].

Enfin, la **sensibilité aux défauts de fabrication** constitue un frein majeur à l'industrialisation. Les défauts à l'échelle nanométrique peuvent induire des variations importantes dans la réponse du matériau, rendant difficile le contrôle reproductible des performances.

Ces limitations ne sont pas insurmontables : des voies d'amélioration sont à l'étude, notamment par l'intégration de matériaux actifs, de structures reconfigurables, ou d'optimisations géométriques assistées par intelligence artificielle [8].

4.5 Interdisciplinarité et nouveaux domaines d'application

Les métamatériaux, initialement conçus pour manipuler les champs électromagnétiques, sont aujourd'hui au cœur d'une dynamique de recherche interdisciplinaire. Leur capacité à contrôler la propagation, la phase et la polarisation des ondes est exploitée bien au-delà de l'optique classique.

Dans le domaine de la **photonique intégrée**, des métasurfaces à base de diélectriques ont été développées pour réaliser des modulateurs ultra-compacts, des interfaces optiques plates et des commutateurs à faible perte [13, 8]. Ces dispositifs trouvent leur place dans les technologies LiDAR, les circuits optiques sur puce et la microscopie de super-résolution.

L'interaction entre les métamatériaux et les **technologies quantiques** est également un axe émergent. Des structures plasmoniques à base de graphène, étudiées par Grigorenko et al., permettent un confinement extrême du champ et une forte interaction avec des émetteurs quantiques, ouvrant la voie à des capteurs et interfaces lumière-matière reconfigurables [9].

En **acoustique**, des métamatériaux phononiques ont été conçus sur le même principe que leurs homologues électromagnétiques, exploitant la structuration périodique pour manipuler la propagation des ondes mécaniques [8, 10].

La recherche explore également des phénomènes comme la **chiralité optique sans chiralité géométrique**, démontrée par Plum et al. [11], ou encore la conception de structures topologiques tirées de la physique de la matière condensée.

L'extension des métamatériaux vers de nouveaux domaines se reflète dans les analyses bibliométriques. La figure 4.2 issue de Lens.org montre que les publications associées concernent aujourd'hui la science des matériaux, l'ingénierie, l'informatique quantique, l'acoustique, et au-delà.

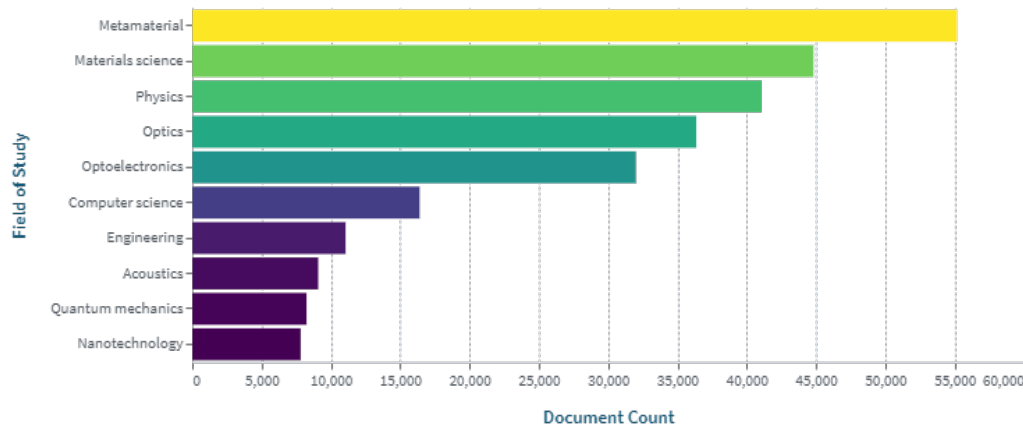


FIGURE 4.2 – Répartition des domaines d'étude associés aux métamatériaux, selon Lens.org [7].

Cette ouverture disciplinaire suggère que les métamatériaux ne forment plus un champ isolé, mais une véritable boîte à outils pour l'ingénierie des ondes dans les sciences et technologies du XXI^e siècle.

Chapitre 5

Conclusion

Les métamatériaux incarnent une avancée majeure dans notre capacité à concevoir des milieux artificiels aux propriétés électromagnétiques inédites. En s’affranchissant des contraintes imposées par les matériaux naturels, ils offrent un moyen de redessiner les lois de propagation des ondes : réflexion inversée, indice négatif, canalisation d’énergie ou cloaking électromagnétique.

Ce mémoire a retracé les grandes étapes de cette révolution, depuis les intuitions théoriques de Veselago jusqu’aux premières réalisations expérimentales de Shelby et Pendry. Nous avons mis en évidence la variété des configurations géométriques — 1D, 2D, 3D — et les défis associés à leur fabrication et à leur modélisation dans les régimes optiques.

L’entrée des métamatériaux dans le domaine visible a révélé de nouveaux verrous : pertes, anisotropie, bande passante limitée. Mais les réponses apportées — matériaux à gain, structures non linéaires, circuits optiques miniaturisés [16] — montrent la vitalité du champ et sa capacité à se réinventer.

Aujourd’hui, les métamatériaux ne sont plus cantonnés à l’optique fondamentale. Ils deviennent des briques fonctionnelles dans des dispositifs intégrés, interactifs, voire intelligents. Leur usage s’étend à la détection, à la photonique quantique, à l’imagerie biomédicale ou encore à l’optoacoustique.

Enfin, les analyses bibliométriques ont confirmé l’essor interdisciplinaire de ce champ, avec des croisements fructueux vers la science des matériaux, l’acoustique, ou l’informatique quantique. Les métamatériaux ne constituent plus une niche : ils forment une boîte à outils pour l’ingénierie des champs, au service des technologies émergentes.

Leur avenir dépendra de notre capacité à les rendre plus performants, plus intégrables, mais aussi à les penser comme des plateformes adaptatives et robustes pour l’optique de demain.

Bibliographie

- [1] V G VESELAGO. « VOLUME 10, NUMBER 4 JANUARY-FEBRUARY 1968 ». en. In : ().
- [2] J. B. PENDRY. « Negative Refraction Makes a Perfect Lens ». en. In : *Physical Review Letters* 85.18 (oct. 2000), p. 3966-3969. ISSN : 0031-9007, 1079-7114. DOI : 10.1103/PhysRevLett.85.3966. URL : <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.85.3966> (visité le 10/05/2025).
- [3] D. R. SMITH et al. « Composite Medium with Simultaneously Negative Permeability and Permittivity ». en. In : *Physical Review Letters* 84.18 (mai 2000), p. 4184-4187. ISSN : 0031-9007, 1079-7114. DOI : 10.1103/PhysRevLett.84.4184. URL : <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.84.4184> (visité le 10/05/2025).
- [4] R. A. SHELBY, D. R. SMITH et S. SCHULTZ. « Experimental Verification of a Negative Index of Refraction ». en. In : *Science* 292.5514 (avr. 2001), p. 77-79. ISSN : 0036-8075, 1095-9203. DOI : 10.1126/science.1058847. URL : <https://www.science.org/doi/10.1126/science.1058847> (visité le 09/05/2025).
- [5] Wenshan CAI et Vladimir M. SHALAEV. *Optical Metamaterials : Fundamentals and Applications*. Springer, 2007. DOI : 10.1007/978-0-387-37825-1.
- [6] Andrea ALÙ et Nader ENGHETA. « Theory of linear chains of metamaterial/plasmonic particles as subdiffraction optical nanotransmission lines ». In : *Physical Review B* 71.7 (2005), p. 075404. DOI : 10.1103/PhysRevB.71.075404.
- [7] LENS.ORG. *Lens.org – The Patent and Scholarly Literature Platform*. Consulté le 26/05/2025. URL : <https://www.lens.org/>.
- [8] Seyedeh Mahsa KAMALI et al. *A review of dielectric optical metasurfaces for wavefront control*. en. arXiv :1804.09802 [physics]. Avr. 2018. DOI : 10.48550/arXiv.1804.09802. URL : <http://arxiv.org/abs/1804.09802> (visité le 26/05/2025).
- [9] A N GRIGORENKO, M POLINI et K S NOVOSELOV. « Graphene plasmonics – optics in flatland ». en. In : ().
- [10] Patrice GENEVET et al. « Recent advances in planar optics : from plasmonic to dielectric metasurfaces ». en. In : *Optica* 4.1 (jan. 2017), p. 139. ISSN : 2334-2536. DOI : 10.1364/OPTICA.4.000139. URL : <https://opg.optica.org/abstract.cfm?URI=optica-4-1-139> (visité le 26/05/2025).
- [11] E. PLUM et al. « Metamaterials : Optical Activity without Chirality ». en. In : *Physical Review Letters* 102.11 (mars 2009), p. 113902. ISSN : 0031-9007, 1079-7114. DOI : 10.1103/PhysRevLett.102.113902. URL : <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.102.113902> (visité le 11/05/2025).

- [12] Jason VALENTINE et al. « Three-dimensional optical metamaterial with a negative refractive index ». en. In : *Nature* 455.7211 (sept. 2008), p. 376-379. ISSN : 0028-0836, 1476-4687. DOI : 10.1038/nature07247. URL : <https://www.nature.com/articles/nature07247> (visité le 10/05/2025).
- [13] Amir ARBABI et al. « Dielectric Metasurfaces for Complete Control of Phase and Polarization with Subwavelength Spatial Resolution and High Transmission ». en. In : *Nature Nanotechnology* 10.11 (nov. 2015). arXiv :1411.1494 [physics], p. 937-943. ISSN : 1748-3387, 1748-3395. DOI : 10.1038/nnano.2015.186. URL : <http://arxiv.org/abs/1411.1494> (visité le 26/05/2025).
- [14] D. SCHURIG et al. « Metamaterial Electromagnetic Cloak at Microwave Frequencies ». en. In : *Science* 314.5801 (nov. 2006), p. 977-980. ISSN : 0036-8075, 1095-9203. DOI : 10.1126/science.1133628. URL : <https://www.science.org/doi/10.1126/science.1133628> (visité le 10/05/2025).
- [15] Nikolay I. ZHELUDEV et Yuri S. KIVSHAR. « Nonlinear optics on the nanoscale ». In : *Nature Materials* 7.5 (2008), p. 420-422. DOI : 10.1038/nmat2163.
- [16] Nader ENGHETA. « Circuit elements at optical frequencies : nanoinductors, nanocapacitors, and nanoresistors ». In : *Science* 317.5845 (2007), p. 1698-1702. DOI : 10.1126/science.1133269.

Résumé

Les métamatériaux sont des structures artificielles dont les propriétés électromagnétiques émergent de leur architecture périodique plutôt que de leur composition chimique. Depuis la démonstration expérimentale d'un indice de réfraction négatif au début des années 2000, le domaine a connu un essor remarquable, tant sur le plan fondamental qu'applicatif. Ce mémoire présente une revue structurée de ces matériaux innovants, en abordant leurs fondements théoriques, leurs différentes catégories (anisotropes, chiraux, actifs. . .), ainsi que les principales percées technologiques vers le domaine optique. L'analyse inclut également des exemples d'applications concrètes (lentilles parfaites, dispositifs d'invisibilité, capteurs) et des perspectives interdisciplinaires, éclairées par des données bibliométriques récentes. En dépit de certains verrous technologiques, les métamatériaux apparaissent comme une plateforme versatile pour l'ingénierie du champ électromagnétique, à la croisée de la nanophotonique, des matériaux avancés et de l'optique quantique.

Mots clés : métamatériaux, indice négatif, lentille parfaite, optique, nanophotonique, invisibilité, bibliométrie.