

**II.1. Introduction :**

L'objectif de ce deuxième chapitre est de présenter les matériaux à Bandes Interdites électromagnétiques (BIE).

Dans un premier temps, nous rappellerons les propriétés générales des matériaux BIE par un bref historique et quelques définitions. Nous aborderons ces matériaux qu'ils soient diélectriques ou métalliques dans des configurations diverses : sans défaut ou avec défauts, dans une ou plusieurs dimensions [1].

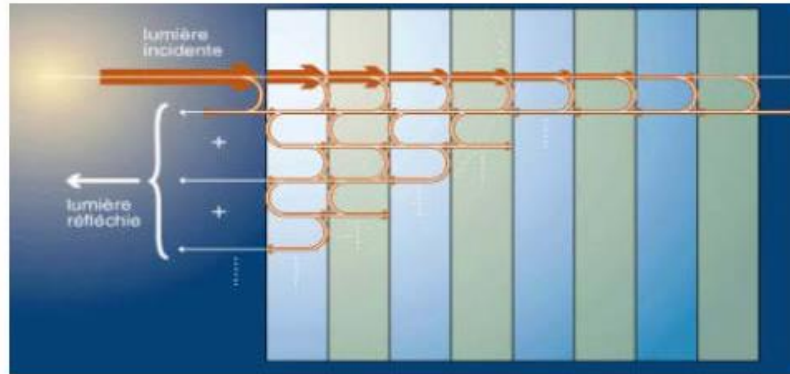
**II.2. Historique :**

Ce nouveau type de structure a été développé par E. Yablonovitch à la fin des années quatre-vingts. En réalité, le tout premier matériau BIP ou cristal photonique a été réalisé sans le savoir par le physicien anglais William Laurence Bragg en 1915. Ce dernier a réussi par l'empilement périodique de couches transparentes à indices de réfraction différents à réfléchir 99,5% de l'énergie incidente, ce qui est impossible avec un miroir classique. Ce phénomène s'explique par de multiples réflexions à l'intérieur même de chaque interface. Elles sont constructives pour une épaisseur particulière des différentes couches [2, 3].

Ces matériaux dont la constante diélectrique est structurée de manière périodique possèdent des fréquences pour lesquelles il n'existe aucun mode de propagation possible à l'intérieur du matériau, autrement appelé bande de fréquence interdite. Ces structures périodiques à une dimension sont déjà connues sous le nom de miroirs de Bragg. Depuis, E. Yablonovitch a eu l'idée d'étendre leur fonctionnement à plusieurs dimensions. Pour simplifier les réalisations, un prototype a été défini avec des bandes interdites mesurables en micro-ondes. Depuis cette innovation, les études qui ont pour objet ces matériaux se sont considérablement accrues. Les domaines de fréquences où ces matériaux sont étudiés correspondent aux fréquences optiques (de 1THz jusqu'à 1000THz) et aux fréquences micro-ondes ou hyperfréquences. La gamme de fréquences facilite la conception et la réalisation de ces matériaux [4].

L'analogie entre l'équation de Schrödinger et l'équation de propagation issue des équations de Maxwell dans les milieux diélectriques permet de rapprocher les propriétés des cristaux solides de celles des cristaux photoniques.

A l'image des semi-conducteurs, dont la régularité du paysage atomique entraîne l'existence d'une bande d'énergie interdite, nous pouvons donc obtenir des bandes de fréquences interdites pour des matériaux diélectriques périodiques. Pour ces bandes de fréquences, aucune onde électromagnétique ne peut se propager dans le matériau et ceci quel que soit l'angle d'incidence considéré selon la structure étudiée. Ces plages de fréquences ont pris le nom générique de Bande Interdite Photonique. Le principe du miroir de Bragg est présenté sur la Figure (II -1) [1].



**Figure (II-1) : Principe du miroir de Bragg [1].**

Pour le domaine des hautes fréquences (HF) ou micro-ondes, nous utiliserons plutôt le terme de matériaux à Bande Interdite Electromagnétique ou BIE qui correspond aux bandes de fréquences étudiées. En effet, leurs propriétés fréquentielles sont transposables pour d'autres longueurs d'ondes car elles sont surtout induites par la ou les périodicités du matériau.

### **II.3. Définitions et propriétés :**

A présent, intéressons-nous brièvement aux propriétés générales pour les trois grandes catégories de matériaux BIE diélectriques caractérisées par leur nombre de périodicités. Nous terminerons par une courte présentation des structures périodiques en métal [1].

#### **II.3.1. Description des matériaux BIE diélectriques :**

Pour les matériaux semi-conducteurs, l'objectif était de contrôler les propriétés électriques des matériaux. Avec les matériaux BIE, nous souhaitons obtenir un contrôle de leurs propriétés électromagnétiques [5].

Les matériaux BIE sont des structures périodiques à une, deux ou trois directions de périodicité constituées d'éléments diélectriques ou métalliques Figure (II-2). Ils ont

la propriété de contrôler la propagation des ondes électromagnétiques. Ces structures peuvent jouer le rôle de filtre fréquentiel et de filtre spatial [1].

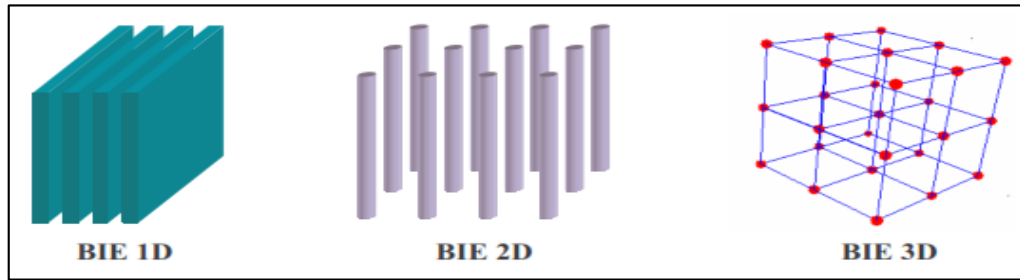


Figure (II -2) : Exemples de structures périodiques 1D, 2D et 3D [6].

Puisque l'incidence des ondes est un facteur limitant les performances de ces structures, les chercheurs travaillent dans les domaines utilisant ces matériaux. Ils ont tenté de développer des structures BIE isotropes qui gardent leurs propriétés quel que soit l'angle d'incidence des ondes [1].

### II.3.1.1. Réseaux unidimensionnels :

Les structures 1D sont les plus anciennes bien qu'elles soient depuis peu intégrées aux structures BIE. En effet, elles ont été déjà longtemps étudiées et utilisées comme miroirs diélectriques ou filtres optiques .

Elles consistent à empiler plusieurs couches de matériaux avec des permittivités différentes (principe du miroir de Bragg). Les bandes interdites sont d'autant plus grandes que le contraste d'indice est élevé pour des épaisseurs de structures égales au quart de la longueur d'onde guidée [1] Figure (II-3).

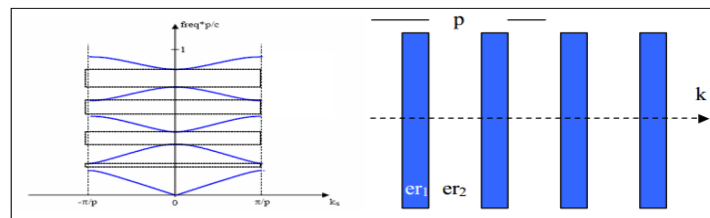


Figure (II -3) : Structure 1D et son diagramme de dispersion [1].

Lors des réalisations, la conception de ce type de réseau est plus simple. Mais les bandes interdites ainsi créées sont sensibles à l'angle d'incidence de l'onde. Pour obtenir un contrôle de la bande interdite quel que soit l'angle d'incidence, il faut étendre la périodicité à 2 voire 3 dimensions [1].

### II.3.1.2. Réseaux bidimensionnels :

Les matériaux 2D sont des cristaux dont la constante diélectrique est structurée périodiquement dans les deux dimensions et reste homogène dans la troisième. Nous pouvons donc étudier les ondes électromagnétiques incidentes à la structure 2D en deux polarisations distinctes : TE (champ électrique parallèle aux barreaux de la structure) et TM (champ électrique perpendiculaire aux barreaux) [7].

Le comportement fréquentiel n'est pas forcément identique selon la polarisation. En effet, l'apparition des bandes interdites dépend du contraste d'indice qui doit être plus élevé selon le type de réseau.

Nous présentons sur la Figure (II-4), plusieurs types de réseaux comme le réseau carré, le réseau triangulaire ou le réseau hexagonal.

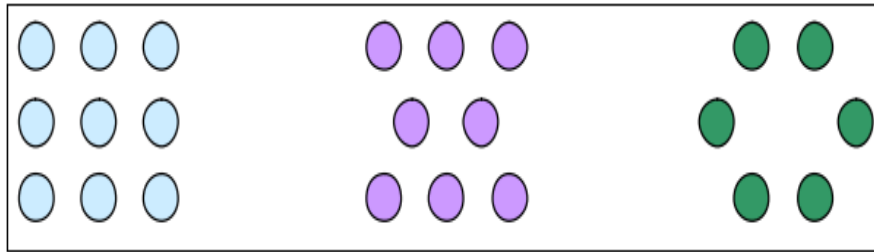


Figure (II-4) : Exemples de différents réseaux 2D [1].

Ce sont les paramètres géométriques c'est-à-dire le pas du réseau, le diamètre des tiges (par conséquent le taux de remplissage de la structure), le motif élémentaire et le contraste d'indice qui fixent les largeurs et les positions des bandes interdites et des bandes permises. Les diagrammes de la Figure (II-5) représentent :

- En abscisse, le parcours fait par le vecteur d'onde lorsqu'il décrit le contour formé par les points de haute symétrie  $\Gamma$ , X, M de la première zone de Brillouin.
- En ordonnée, la fréquence des modes calculés.

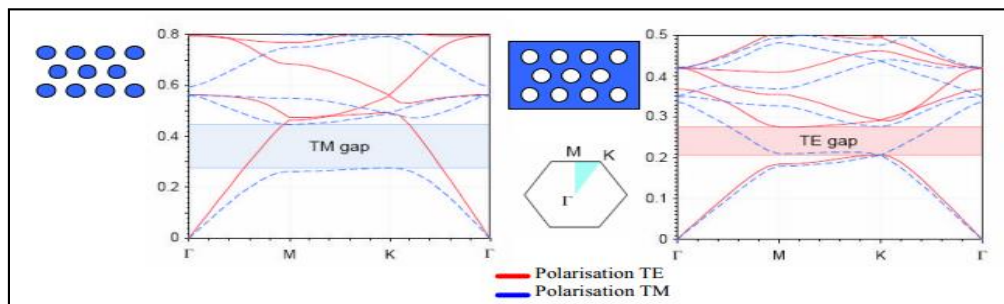


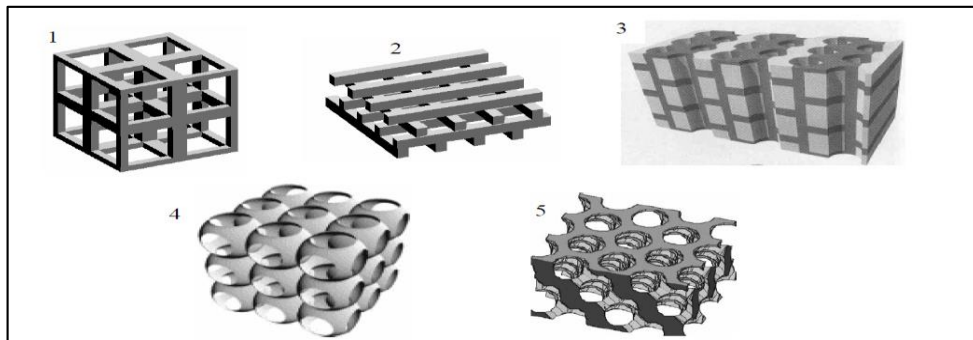
Figure (II-5) : Bandes interdites en fonction du réseau et du type de polarisation [1].

Dans les deux cas, nous constatons qu'il n'y a pas de recouvrement des bandes interdites dans les deux polarisations (en étudiant ici les diagrammes de bande d'une structure 2D en polarisation TE et TM). Mais, lorsque les bandes interdites correspondant à chacune des polarisations se recouvrent même de façon partielle, nous parlons alors de bandes interdites complètes.

En réalité, il n'y a que dans le cas des structures en trois dimensions que nous pouvons obtenir théoriquement une vraie bande interdite complète, c'est-à-dire dans le cas où il n'y a aucune propagation possible quelles que soient la polarisation et la direction de l'onde incidente [1].

### II.3.1.3. Réseaux tridimensionnels :

Les structures 3D sont les premières structures étudiées avec les structures 1D ou réseaux de Bragg. L'objectif était d'obtenir des structures 3D fonctionnant sur les mêmes principes que les miroirs de Bragg mais possédant une bande interdite électromagnétique complète c'est-à-dire dans toutes les directions de l'espace. Il existe un grand nombre de structures possibles [8] Figure (II-6).



**Figure (II-6) : Différentes structures 3D comme la structure cubique (1), le tas de bois (2), la structure multicouches (3), les opales ou opales inversées (4) et la Yablonovite (5) [1]**

En réalité, peu de structures 3D possèdent une bande interdite complète. Ho, Chan et Soukoulis ont été les premiers à montrer théoriquement la présence d'une bande interdite complète dans une structure à symétrie Cubique à Face Centrée (CFC) ou communément appelée structure diamant [9].

Les deux types de structures BIE 3D réalisées dans le domaine des micro-ondes pour des raisons évidentes de contraintes technologiques plus faibles que dans le domaine de l'optique sont la Yablonovite (un diélectrique percé de trous d'air) et la structure tas de bois.

Cette dernière est un empilement de tiges diélectriques rectangulaires ou circulaires. Les deux niveaux consécutifs sont perpendiculaires et les deux plans consécutifs de tiges parallèles sont décalés d'une demi-période. Quelques structures de type tas de bois ont été réalisées dans le domaine des micro-ondes soit avec des tiges d'aluminium, soit avec du silicium grâce à l'empilement des grilles gravées les unes sur les autres avec un pivotement de  $90^\circ$  à chaque étage et en respectant l'alignement de l'ensemble [10].

Auguste Bravais a établi un classement des différentes familles de cristaux. Il a montré qu'ils peuvent se répartir en 7 types de mailles (7 systèmes cristallins) et 14 types de réseaux [1].

Ceux-ci sont à la base des structures périodiques tridimensionnelles.

### **II.3.2. Description des structures BIE métalliques :**

Les premiers matériaux à bandes interdites ont été réalisés avec des matériaux purement diélectriques pour répondre aux applications dans le domaine de l'optique. En effet dans ce domaine, l'utilisation de structures métalliques était difficile car il y avait de fortes pertes des métaux à ces fréquences. Par contre aux fréquences micro-ondes et radiofréquences, les pertes deviennent négligeables dans certains cas. Les métaux sont donc de quasi parfaits réflecteurs avec de faibles absorptions. Pour des fréquences de l'ordre du gigahertz, l'épaisseur de peau  $d$  est très faible devant la longueur d'onde qui est bien en dessous des fréquences optiques [1].

Il y a une cinquantaine d'années, les premières études portaient sur des éléments métalliques possédant différents axes de périodicité dans le but de réaliser des polariseurs et des réflecteurs. Elles ont aussi permis de concevoir des Surfaces Sélectives en Fréquence ou SSF Figure (II-7) mais la plupart concerne des structures monocouches avec des motifs 1D ou 2D. Les structures BIE Métalliques ou encore communément appelées BIEM sont une extension de ces réseaux périodiques métalliques à des réseaux multicouches à plusieurs dimensions [11].

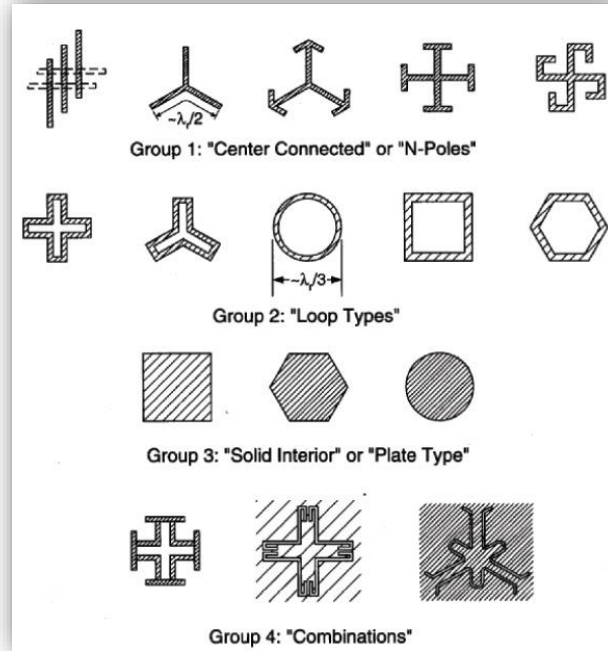


Figure (II-7) : Exemples de Surfaces Sélectives en Fréquence (SSF) [1].

## II.4. Comportements électromagnétiques :

Pour étudier les propriétés électromagnétiques des structures périodiques et leurs comportements fréquentiels, Le matériau doit être éclairé avec une onde plane en incidence normale et déduire les coefficients de réflexion et de transmission. Cette étude peut être réalisée soit par la méthode numérique FDTD, soit par la méthode des impédances ramenées [1].

### II.4.1. Structures diélectriques :

La principale caractéristique de ces structures est leur aptitude à fonctionner comme un miroir. Elles permettent de réfléchir partiellement ou quasi totalement les ondes électromagnétiques dans une certaine bande de fréquences et cela pour des incidences particulières selon les types de matériaux utilisés [12, 13] La Figure (II-8) montre le module du coefficient de transmission  $|S_{21}|$  et le module du coefficient de réflexion d'une structure 1D sans défaut soumise à une onde électromagnétique d'incidence normale.



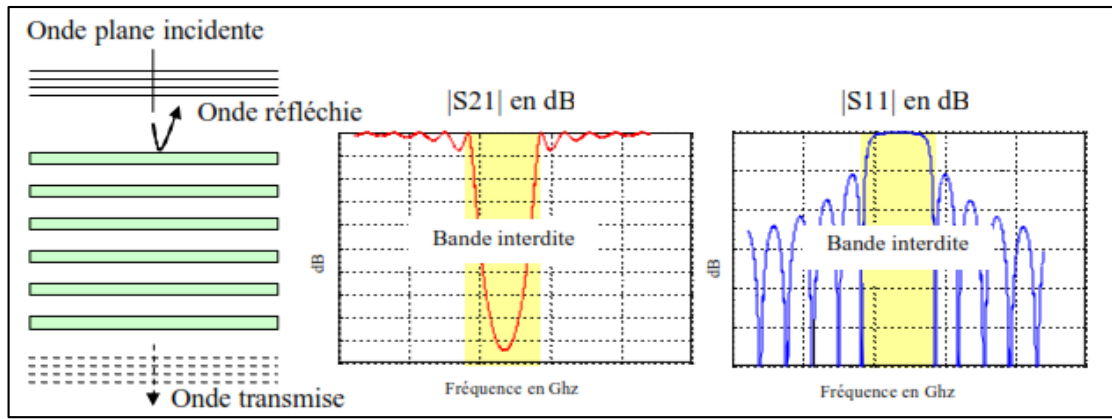


Figure (II-8) : Coefficient de transmission et de réflexion d'une structure 1D [12, 13].

Ces structures réfléchissent les ondes grâce à un phénomène d'interférence constructive entre les différentes couches composant le matériau. L'onde incidente est partiellement réfléchiée à chaque interface entre deux couches. Du fait de la stratification périodique, les ondes ainsi réfléchies présentent un déphasage bien défini les uns par rapport aux autres. Elles interfèrent donc de manière constructive ou destructive selon la valeur du déphasage qui dépend entre autre de la longueur d'onde et de l'angle d'incidence Figure (II-9) [1].

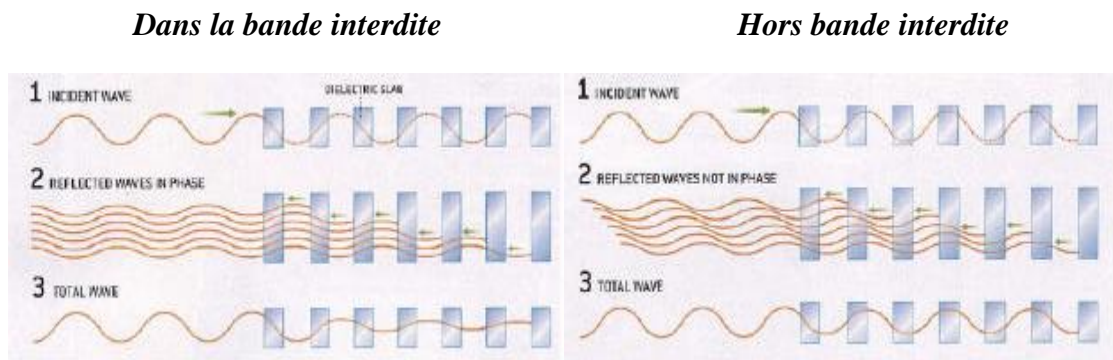


Figure (II-9) : Propagation à travers une structure BIE 1D [1]

Une autre méthode pour étudier les matériaux BIE consiste à calculer le diagramme de dispersion du matériau infini. Le réseau cristallin est transposé dans l'espace réciproque des vecteurs d'ondes. Un nouveau réseau orthogonal au réseau cristallin de l'espace direct est ainsi obtenu. Cela permet d'en déduire la première zone de Brillouin qui représente le domaine élémentaire dans lequel doivent être recherchées les solutions des équations de propagation. Cette étude permet de déterminer si le matériau possède



une bande de fréquence interdite commune à tous les angles de propagation envisageables.

Cette technique est particulièrement adaptée aux matériaux périodiques à plusieurs dimensions car elle considère l'ensemble des directions de propagation électromagnétique dans le matériau pour chaque fréquence étudiée.

Les propriétés du matériau infini sont représentées sous la forme d'un diagramme de bande ou d'un diagramme de dispersion [1] Figure (II-10).

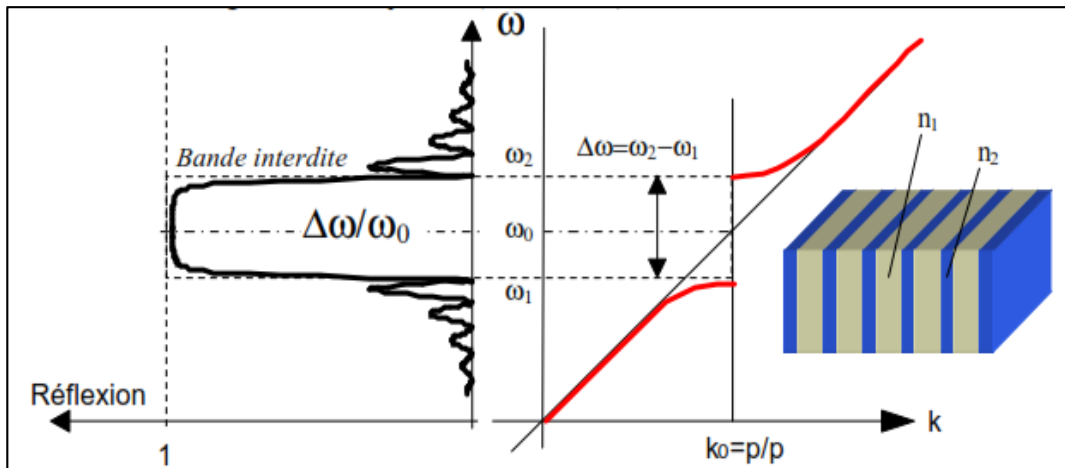


Figure (II-10) : Bande interdite et diagramme de dispersion pour des structures 1D [1].

Nous définissons la bande interdite selon sa largeur  $\Delta\omega$  et aussi sa fréquence centrale  $\omega_0$ .

#### II.4.2. Structures métalliques :

Les matériaux métalliques périodiques peuvent se présenter sous la forme de tiges ou de grilles possédant un ou plusieurs axes de périodicité .

Toutes les grilles possèdent une bande interdite basse fréquence dans laquelle elles se comportent comme de parfaits miroirs. En effet, aux fréquences basses, l'impédance dérivée représentant la grille métallique est plus forte que l'impédance caractéristique de la ligne de transmission représentant le vide. Ce comportement présente une nouveauté par rapport aux réseaux périodiques BIE diélectriques. En effet, ils possèdent une bande permise basse fréquence jusqu'à leur première bande interdite fixée par leur périodicité et leur permittivité [1] Figure (II-11).

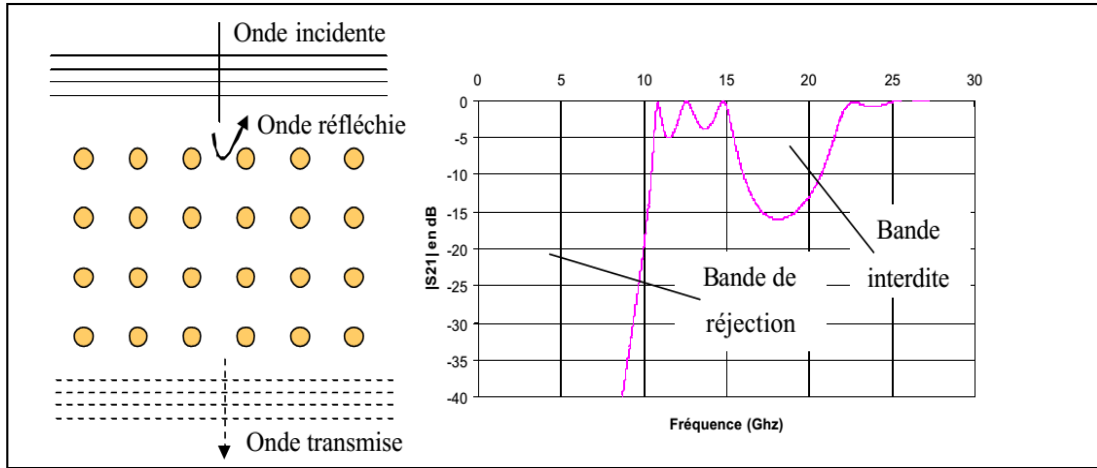


Figure (II-11) : Coefficient de transmission d'une structure BIEM [1].

Lorsque le pas du réseau métallique diminue, cela permet de creuser la réflexion basse fréquence. Si les tiges sont très espacées, le réseau de grilles équivaut à une surface métallique seulement pour les très grandes longueurs d'ondes. La bande de réjection dépend de la périodicité des éléments métalliques.

Dans le cas où nous modifions le diamètre ou la section des tiges constituant ces structures métalliques, nous accroissons la réjection à basse fréquence. Cela revient à diminuer la distance entre les tiges et par conséquent le pas du réseau [14, 15]. Grâce à cet effet à basse fréquence, ces grilles sont un bon moyen de réaliser des filtres passe-bas.

## II.5. Caractéristiques et performances de l'antenne à résonateur BIE :

Les antennes à Bande Interdite Electromagnétique (BIE) sont des structures à fort gain présentant une meilleure compacité comparées aux réseaux d'antennes ou aux antennes lentille [16].

### II.5.1. Adaptation de l'antenne :

L'adaptation d'une antenne quelconque est un des objectifs incontournables et primordiaux lors de la réalisation d'une antenne [17].

### II.5.2 Diagrammes de rayonnement et gain :

Le diagramme de rayonnement doit présenter un seul lobe principal à la verticale du plan de masse. En effet, la direction de l'énergie émise par le système d'alimentation doit correspondre avec la direction de propagation autorisée par le matériau BIE. Dans ce cas, le dispositif complet aura un fonctionnement optimal. De plus, cette énergie ne doit pas

être rayonnée hors du BIE. Il est donc primordial d'utiliser des sources ayant un rayonnement de type antenne plaquée avec un niveau faible des lobes secondaires pour favoriser la direction dans l'axe [17] Figure (II-12).

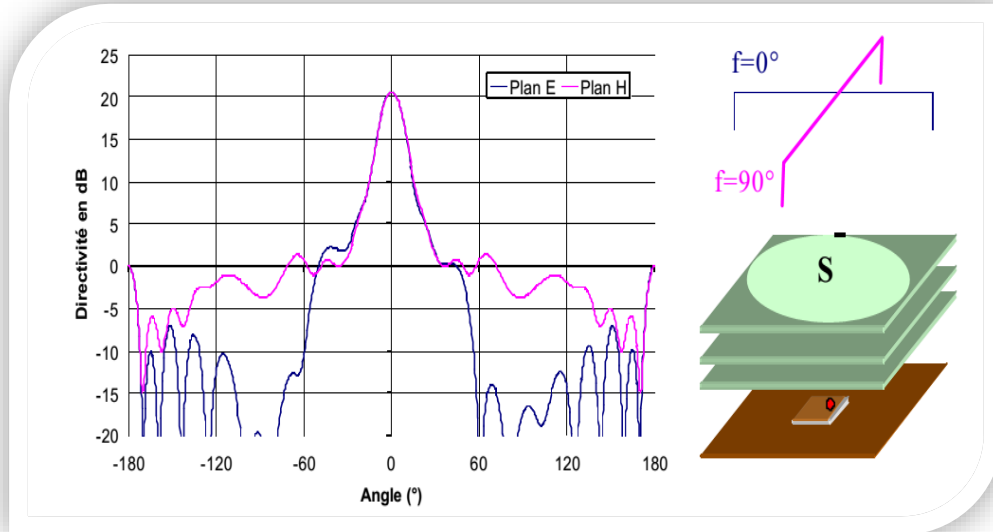


Figure (II-12) : Diagramme de rayonnement et directivité d'une antenne à résonateur BIE [17].

## II.6. Notions de défaut dans les structures périodiques :

Les propriétés des structures BIE deviennent particulièrement intéressantes lorsque l'on introduit un ou plusieurs défauts dans la structure [1].

### II.6.1. Introduction d'un défaut dans les structures BIE :

#### II.6.1.1. Les façons de générer un défaut :

La création de défaut dans ces structures est engendrée par la rupture de la périodicité d'éléments périodiques. Cette rupture va créer l'ouverture d'une bande de fréquence autorisée à l'intérieur de la bande interdite. La position et la largeur de la bande passante sont gérées par les caractéristiques du défaut Figure (I-13) [1].

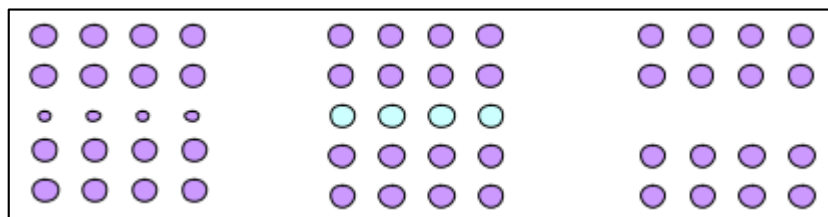


Figure (II-13) : Différents types de défauts basés sur la rupture de la périodicité du motif élémentaire[1].

Dans des structures 1D, le défaut ne peut être envisagé que dans la direction de périodicité. En revanche pour les structures 3D, nous pouvons créer des défauts dans une, deux ou trois directions (sous la forme de micro cavité) Figure (II-14) .

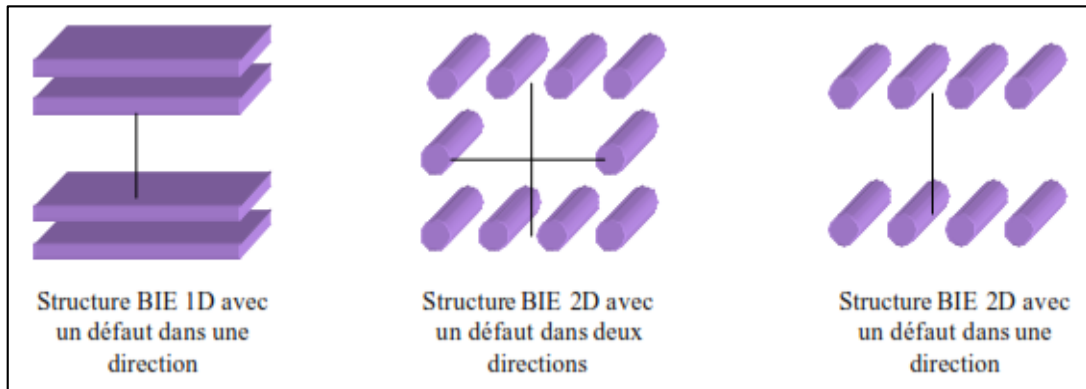


Figure (II-14) : Exemple de dimension du défaut [1].

Afin d'élargir le spectre des possibilités offert par les structures BIE, nous allons présenter dans ce paragraphe les effets provoqués par l'insertion d'un défaut à l'intérieur de la structure en rompant la périodicité de la structure. Le type de défaut présenté ici correspond à un défaut basé sur la rupture de la périodicité dans une direction. [1].

## II.7 Méthodes numériques pour l'analyse des réseaux BIE :

Nous pouvons citer six méthodes numériques couramment utilisées pour les analyses des structures BIE :

- (1) Méthode des ondes planes
- (2) Méthode FDTD
- (3) Méthode par éléments finis
- (4) Méthode de matrice de transfert
- (5) Méthode Scattering Matrix Method (SMM)
- (6) Méthode de réseaux de diffraction . [18].

## II.8.Applications et utilisations des structures BIE à défaut :

Dans le domaine de l'optique, de nombreuses applications ont été développées puis ce fut dans celui des fréquences centimétriques et millimétriques. Les réalisations sont en effet plus simples compte tenu des dimensions à ces fréquences.

Quelle que soit la structure électromagnétique étudiée, les variations des champs dépendent des motifs choisis. On peut classer les structures qui utilisent les structures BIE en deux familles :

- ✓ Celles qui utilisent la périodicité des motifs :
  - Les antennes: les champs électromagnétiques ne sont plus piégés dans le plan de masse arrière, nous obtenons ainsi moins de lobes secondaires.
  - Les filtres: la défection dans le plan de masse d'une ligne permet d'éliminer les ondes de surface en introduisant une importante impédance de surface. Plus le nombre de motifs est grand, plus la bande rejetée est profonde et large.
  - Les structures cristallines artificielles: le but est d'empêcher la propagation de l'onde quel que soit l'angle d'incidence de l'onde excitatrice.
- ✓ Celles qui utilisent la périodicité des motifs et des ruptures de périodicité :
  - Les filtres très sélectifs: la rupture de la périodicité permet la transmission de l'onde dans la bande interdite à une fréquence précise, fonction de cette rupture.
  - Les guides: un « couloir » est créé au milieu du réseau périodique, l'onde le suit comme dans le cas d'un guide.
  - Les coupleurs: en ajoutant à deux guides parallèles une jonction commune, associée à des éléments actifs, nous pouvons orienter l'onde dans les guides voulus.
  - Les antennes: les champs électromagnétiques sont piégés dans le défaut, nous obtenons ainsi une antenne résonante et directive.

Naturellement, cette liste n'est pas exhaustive. L'apparition d'éléments actifs dans les structures à bande interdite permet de nombreuses modifications et de multiples utilisations d'une même structure. Toutefois, une des voies les plus prometteuses concerne le domaine des antennes.

Un certain nombre de travaux ont été réalisés dans le but de prouver l'intérêt de disposer d'un substrat BIE. Il a été montré que le fait de disposer d'un substrat BIE métallique planaire au-dessous d'un monopole améliorerait les performances du dispositif. La présence d'un substrat BIE diélectrique sous une antenne patch a pour principale conséquence de réduire les effets d'onde de surface ainsi que le niveau des lobes secondaires.

Les matériaux BIE sont également intéressants pour la discrétion. Il est possible de réduire la Surface Equivalente Radar (SER) d'un aérien en couplant ce dernier avec un BIE métallique possédant des caractéristiques de transparence durant le temps d'émission ou de réception et des caractéristiques d'opacité pendant le reste du temps .

Après avoir recherché la meilleure application de ces matériaux périodiques, l'antenne à résonateur à bande interdite électromagnétique 1D a émergé en créant un défaut à l'intérieur même de la structure et en l'utilisant sous la forme d'un radôme selon les premières interprétations. Par la suite, différentes applications ont vu le jour comme par exemple [19] :

- l'optimisation d'un réflecteur spatial à couverture cellulaire .
- une antenne bi-bande .
- des antennes possédant un fort gain (autour de 30dB) à 14Ghz et à 40Ghz .
- une antenne BIE coaxiale omnidirectionnelle en azimut .
- une antenne bidirectionnelle .

## **II.9. Conclusion :**

Ce chapitre rappelle brièvement l'état de l'art sur les matériaux périodiques BIE aussi bien leur histoire que leurs propriétés. Ces dernières intéressent de nombreux chercheurs qui continuent de démontrer l'intérêt d'utiliser ces matériaux soit pour remplacer des systèmes déjà existants mais plus contraignants, soit pour apporter une innovation toute particulière dans un domaine précis. L'étude de ces matériaux reste un sujet très riche, tout comme le choix de leurs applications. Pour comprendre leur fonctionnement, elles requièrent de nombreuses notions.

La conception de matériaux BIE nécessite de tenir compte de la géométrie de la structure. Selon le nombre de directions périodiques et la nature du matériau, En effet, une telle structuration en réseau permet d'introduire des conditions de résonance dans les mécanismes de propagation des ondes électromagnétiques. Cela se traduit alors par l'existence d'une succession de bandes interdites et permises dans les diagrammes de bandes.

L'utilisation d'un défaut dans les structures BIE, qu'il soit périodique ou local, modifiera le fonctionnement du matériau à cette fréquence puisqu'un seul mode pourra se propager.

# BIBLIOGRAPHIE

- [1] **J. Tangyu** "*Caractérisation Des Matériaux A Bande Interdite Electromagnetique Multiperiodiques Et Leurs Applications Aux Antennes* ", Thèse de Doctorat, Université De Limoges, 2005.
- [2] **E. Yablonovitch**, "*Photonic Band-Gap crystals*", Phys.: Condens. Matter 5, No 16, pp. 2443-2460, April 1993.
- [3] **E. Yablonovitch**, "*Photonic Band-Gap structure*", J. Opt. Society Vol 10, p.283-293, Feb 1993.
- [4] **E. Yablonovitch**, "*Photonic crystals semi-conductors of light*", Scientific American.
- [5] **A. Polman, P. Witzius**, "*Materials science aspects of photonic crystals*", Guest editors MRS bulletin August 2001.
- [6] **L. Leger**, "*Nouveaux développements autour des potentialités de L'antenne BIE planaire* ", Thèse de doctorat - Université de Limoges- 2004.
- [7] **M. Plihal, A.A Maradudin**, "*Photonic band structure of two dimensional systems: the triangular lattice*", Phys .Rev B / pp 8565 – vol 44 1991.
- [8] **G.S Smith, M.P Kesler, J.G Maloney**, "*Dipole antennas used with all dielectric photonic band gap reflector: gain, field, patterns and input impedance crystals*" ,M.O.T.L / Vol 21, N°3, pp19 1-196 – May 5 1999.
- [9] **M.M Sigalas, R.Biswas , Q.Li ,D.Crouch, W. Leung, R . Ackobswoodbury, B.Lough, S.Nielsen , S. Mc Calamont, G. Tuttle, K.M. Ho**, "*Dipole antennas on photonic band gap crystals- Experiment and simulation* ", M.O.T.L / Vol 15, N°3, pp153-158 – June 20 1997.
- [10] **G. Kiriakidis, N. Katsarakis**, "*Fabrication of 2-D and 3-D PBG crystals in the GHz and THz regions*", Mater. Phys. Mech (2000).
- [11] **M. M. Sigalas, C. T. Chan, K. M. Ho and C. M. Soukoulis**, "*Metallic photonic band-gap materials*" Appl. Phys letters (1995).
- [12] **M. Thévenot, A. Reineix, B. Jecko**, "*F.D.T.D. approach for modelling P.B.G. structure*", IOP Publishing Ltd 1999.
- [13] **M. S. Denis** "*Contribution à l'étude des matériaux à bandes interdites photoniques. Applications dans le domaine des antennes imprimées*", Thèse de doctorat- n°40-1998- Université de Limoges- 1998.
- [14] **O. Vanbesien, J. Danglot, J. Carbonell, M. Fernandez et D. Lippens**, "*Matériaux à gap de photons*", Congrès JCMM - Le Touquet 2001.
- [15] **G. Polasnet, L. Desclos, M. Madihian, J. Lenormand, Ph. Geslin** "*Etude paramétrique des matériaux à bande interdite photonique métallique (BIPM)* ", Congrès JCMM - Le Touquet 2001.



[16] **O. Roncière, R. Sauleau, K. Mahdjoubi.** "*Antenne résonateur BIE à faisceau contrôlable*", Université de Rennes.215-220. pp1Nov 2005.

[17] **L. Freytag** "*Conception, réalisation et caractérisation d'antennes pour station de base des réseaux de télécommunication sans fil*", Thèse de doctorat- n°29-2004- Université de Limoges- 2004.

[18] **M. Soumia** , " *Étude théorique et expérimentale des matériaux à bandes interdites photoniques bidimensionnels (BIP 2D) en Micro-Ondes : Application à l'ultraréfraction* ",PhD thesis, Université Paris XI Orsay, 2005.

[19] **H-Yannick Merle**, " *Étude de la dispersion électromagnétique dans les matériaux périodiques diélectriques bidimensionnels* " PhD thesis, Université de Limoges, 2003.