

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE FERHAT ABBAS – SETIF
UFAS (ALGERIE)

MEMOIRE

Présenté à l'Institut d'Optique et de Mécanique de Précision
Pour l'obtention du diplôme de

MAGISTER

Option : Optique Appliquée

Par

Mr. Tahar GHADBANE

THEME

Simulation des métamatériaux à indice de réfraction négatif

Soutenu le :20/11/2011

devant la commission d'examen :

Amel HACHEMI

Pr. à l'université de Sétif

Présidente

Hocine GUESSAS

M.C. à l'université de Sétif

Rapporteur

Abdelkrim BENIAICHE

M.C. à l'université de Sétif

Examineur

Ismail DJABI

M.C. à l'université de Sétif

Examineur

Remerciements

Je remercie Madame Amel HACHEMI Professeur à l'université de Sétif de m'avoir fait l'honneur de présider le jury de soutenance ainsi que Monsieur Hocine GUESSAS Maître de conférence à l'université de Sétif qui m'a donné cette chance et accordé une entière confiance sur le sujet proposé "les métamatériaux" qui est une première au niveau de notre institut, et je le remercie aussi pour avoir accepté la tâche de "rapporteur" et de juger ces travaux.

Je remercie également Monsieur Abdelkrim BENIAICHE Maître de conférence à l'université de Sétif d'avoir fait partie de ce jury et de son soutien durant l'année théorique.

Je remercie également Monsieur Ismail DJABI Maître de conférence à l'université de Sétif d'avoir fait partie de ce jury

Je remercie Messieurs Ismail GHADBANE et Kamel MOHAMED enseignants à l'université de Mohamed boudiaf à M'sila pour ces précieuses aides (dépannages) sous Matlab.

Je n'oublie pas de remercier toutes les personnes qui me sont chères, en particulier mon père et ma mère pour m'avoir poussé à faire ces études ainsi que leurs conseils précieux, eux qui m'ont soutenu et encouragé durant ce travail, qu'ils trouvent ici toute ma reconnaissance.

Je n'oublie pas de remercier ma petite famille, ma femme, mes chers enfants, Mohamed, Nour-elhouda, Zakarya et la petite Arwa pour leurs patientes durant ces derniers mois.

Table des matières

Remerciements	1
Table des matières	2
Notation utilisées	5
Introduction générale.....	6
Première partie Etude bibliographique	8
Chapitre 1 : Métamatériaux Et Cristaux photoniques	9
I-1 Introduction.....	10
1-2 Electromagnétisme et matériaux.....	10
I-2-2 Classification des matériaux en fonction de leurs permittivité et perméabilité	11
I-3 Modélisation analytique	14
I-4 Réfraction négatif.....	17
I-5 Focalisation.....	17
I-6 Les cristaux photoniques.....	18
1-6-1 Définition	18
• La dimensionnalité:	19
• La symétrie:	19
• Le paramètre du réseau	19
• Le contraste d'indice de réfraction.....	19
1-7 Notion de bande interdite photonique.....	19
1-8 Applications.....	22
Chapitre 2 : Les Méthodes Numériques Et Outils de simulation	24
2-1 Introduction	25
2-2 Méthode des ondes planes	25
2-2-1 Application aux matériaux composites.....	27
2-2-2 Maillage.....	30
2-3 Méthode des différences finies temporelles (FDTD)	31

2-3-1 Principe de la méthode	31
2-3-2 Discrétisation des équations de Maxwell et algorithme de Yee.....	34
2-3-3 Algorithme FDTD.....	36
3-3-4 Condition de stabilité.....	37
3-3-5 Dispersion numérique.....	38
2-4 Outils de simulation	38
2-4-1 La structure périodique bidimensionnelle.....	38
2-5 Méthode de calcul.....	39
2-6 Polarisation Transverse Electrique (TE) et Transverse Magnétique (TM).....	40
2-7 Réseau réciproque et zone de Brillouin	40
2-8 Diagramme de bande :.....	41
2-8 Conclusion	43
Deuxième partie : Simulations Numériques	44
Chapitre 3 : l'approche métallique.....	45
3-1 Introduction	46
3-2 Etude paramétrique des différents motifs présentant une ε et μ négatives	46
3-3 Etude paramétrique d'une tige métallique.....	46
3-3 Etude paramétrique d'une tige métallique.....	47
3-3-1 Permittivité suivant Drude (Annexe1)	47
3-3-2 permittivité suivant Maslovski (Annexe2)	50
3-3-3 Perméabilité suivant Lorentz	53
3-4 Etude paramétrique d'un SRR (Annexe3)	56
Conclusion	60
Chapitre 4 : L'approche diélectrique.....	61
4-1 Introduction	62
4-2 Définition des paramètres d'entrée.....	62
4-3 Définition des paramètres de sortie :	62

4-4 résultats de simulation.....	63
4-4-1 Diagramme de bande pour $f=20\%$	63
4-4-2 Diagramme de bande pour $f=30\%$	64
4-4-3 Diagramme de bande pour $f=40\%$	65
4-4-4 Diagramme de bande pour $f=50\%$	66
4-4-5 Diagramme de bande pour $f=60\%$	67
4-4-6 Diagramme de bande pour $f=70\%$	68
4-4-7 Diagramme de bande pour $f=80\%$	69
4-4-8 Diagramme de bande pour $f=90\%$	70
4-5 Comportement de Largueur de la bande interdite en fonction du Facteur de remplissage Pour la première bande interdite.....	71
4-5-1 Comportement de L BI TM en fonction du facteur de remplissage.....	71
4-5-2 Comportement de L BI TE en fonction du facteur de remplissage.....	72
4-5-3 Comportement de L BI CM en fonction du facteur de remplissage.....	72
4-6 Choix du Facteur de remplissage optimal.....	73
4-7 Calcul de l'indice de réfraction:.....	75
4-7 Interprétations des résultats et conclusion.....	77
Conclusion générale et perspectives.....	78
Bibliographie.....	79
Annexes.....	84

Notation utilisées

\vec{E} : champ électrique

\vec{H} : champ magnétique

\vec{B} : Vecteur induction magnétique

\vec{D} : Vecteur induction électrique

ϵ_0 : permittivité Electrique du vide

μ_0 : perméabilité magnétique du vide

c_0 : vitesse de la lumière dans le vide

SRR : Split Ring Resonators (résonateur en anneau fendue)

σ : conductivité du métal des tiges

r : rayon des tiges

a : périodicité du réseau

CP : Cristaux photonique

FDTD : finite difference time domain (différences finies dans le domaine temporel)

FE : finite element (éléments finis)

f : Facteur de remplissage

TM : transverse magnétique

TE : transverse électrique

L BI TM : Largueur de la bande interdite TM

L BI TE : Largueur de la bande interdite TE

L BI CM : Largueur de la bande commune

ω_i : Fréquence maximale de la i^{eme} bande

ω_{i+1} : Fréquence minimale de la $i^{\text{eme}}+1$ bande

$\omega_{i+1} - \omega_i$: Largueur la bande interdite

$\omega_{j+1} - \omega_j$: Largueur la bande interdite commune

Introduction générale

les recherches sur les structures artificielles ont permis de réaliser pratiquement ce que Victor Veselago [1] avait prédit dans les années 70, à savoir une ingénierie de perméabilité et de permittivité qui rendues toutes les deux simultanément négatives, rendent possible l'existence d'effets de réfraction négative. Ces concepts établis, John Pendry [2] a alors proposé la notion de « super-lentille » plate qui grâce à un indice de réfraction égal à -1 doit être capable de focaliser une source ponctuelle avec une résolution parfaite, brisant grâce à un phénomène d'amplification des ondes évanescentes la limite de Rayleigh ($\lambda/2$). On est ici dans le domaine des métamatériaux caractérisés par une structuration largement sous longueur d'onde [3].

Entre les années 1980 et 1990, les sciences des matériaux ont connu une renaissance grâce aux développements des outils de simulation de la morphologie de ces systèmes complexes. La simulation numérique est ainsi devenue une troisième voie de recherche entre la théorie et l'expérience. A l'heure actuelle, les simulations numériques permettent de traiter la majeure partie des problèmes physiques ouverts et les modèles utilisés ne cessent d'évoluer.

Les résultats numériques peuvent ainsi contribuer à l'acceptation ou au rejet des théories analytiques et peuvent également indiquer les directions dans lesquelles de nouvelles approches doivent être développées [4].

Parmi les méthodes numériques utilisées pour traiter les problèmes fondamentaux concernant les matériaux composites, on notera celles basées sur les différences finies (FDTD) et les éléments finis (FE).

les recherches se sont tournées vers l'étude des régimes de propagation accessibles dans les bandes passantes des cristaux photoniques. On s'est alors rendu compte que sous certaines conditions, il était possible de mettre en évidence des régimes de fonctionnement où la vitesse de phase et la vitesse de groupe sont de signe opposé, révélateur également d'un effet de réfraction négative.

Dans le domaine des longueurs d'onde optique, pour lequel les métamatériaux montrent actuellement des limites car ils utilisent généralement des métaux comme éléments constitutifs, les cristaux photoniques bidimensionnels (ou 2.5 D) diélectriques sont réapparus comme des candidats potentiels pour exploiter les effets de réfraction négative. De plus, les technologies avancées de la nanoélectronique permettent d'espérer la fabrication et l'intégration de ces objets aux fonctionnalités nouvelles [3].

Ce mémoire se divise en deux parties, la première partie est divisée en deux chapitres, le premier consacré à une synthèse bibliographique sur les métamatériaux et les cristaux photoniques et le deuxième sur les méthodes numériques et les différents outils de simulation pour le calcul de la permittivité et la perméabilité.

La deuxième partie traite la simulation des différents motifs considérés pour avoir une permittivité et perméabilité négatives et par suite un indice de réfraction négatif, répartie en deux chapitres, le premier traite les motifs à base métallique et le second à base diélectrique. Ces résultats de simulations obtenus par l'élaboration d'un code Matlab basé sur l'application de la méthode des ondes planes (FE).

Enfin, une conclusion résume et interprète les résultats obtenus dans cette thèse.

Première partie
Etude bibliographique

Chapitre 1 :
Métamatériaux
Et
Cristaux photoniques

I-1 Introduction

Par définition, les métamatériaux sont des matériaux artificiels dont la structuration, à des échelles très inférieures aux longueurs d'onde de travail, permet de les assimiler à des matériaux homogènes. Cette définition, dans son expression la plus générale, montre que le concept de métamatériau peut couvrir tous les domaines de la physique. Cette remarque est illustrée dans la littérature par les différents travaux publiés dans les domaines de l'électromagnétisme incluant l'optique, de l'acoustique, et de la mécanique de fluide [5].

La définition est donc souvent complétée par une seconde condition sur l'échelle de la structuration : celle-ci doit être grande devant l'échelle atomique. On comprend ainsi que l'échelle de conception des métamatériaux est une échelle intermédiaire, parfois dite « échelle mésoscopique ». Sa limite inférieure est de l'ordre du nanomètre, alors que sa limite supérieure correspond à une fraction de la longueur d'onde.

Bien évidemment, les métamatériaux ne présentent un intérêt que lorsqu'ils permettent soit d'accéder à des valeurs de paramètres effectifs difficiles, ou impossibles, à atteindre avec des matériaux usuels, soit d'accroître les possibilités de contrôle de ces paramètres, par exemple en termes d'anisotropie ou de gradients spatiaux [6].

1-2 Electromagnétisme et matériaux.

1-2-1 Equations de Maxwell et formalisme.

En 1861, Maxwell synthétise quatre équations permettant de décrire les phénomènes électromagnétiques en englobant les lois découvertes par ses prédécesseurs avec les équations dites de :

$$\text{- Maxwell - Gauss : } \operatorname{div}(\vec{B}) = 0 \quad 1-1$$

$$\operatorname{div}(\vec{E}) = -\frac{\rho}{\varepsilon_0} \quad 1-2$$

$$\text{- Maxwell - Faraday : } \operatorname{rot}(\vec{E}) = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad 1-3$$

$$\text{- Maxwell - Ampère : } \operatorname{rot}(\vec{B}) = \mu \vec{j} + \mu \varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad 1-4$$

$$\text{Avec : } \begin{cases} \vec{B} = \mu \vec{H} = \mu_0 \mu_r \vec{H} \\ \vec{E} = \varepsilon \vec{D} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \vec{D} \end{cases} \quad 1-5$$

En combinant deux à deux les équations des relations (1-3) et (1-1) et (1-2) et (1-4), sachant que $\operatorname{rot}(\operatorname{rot}(\vec{V})) = \operatorname{grad}(\operatorname{div}(\vec{V})) - \Delta \vec{V}$ on obtient une équation dite de propagation pour les champs \vec{E} et \vec{H} dans un milieu sans charges :

$$\mu\varepsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} - \Delta \vec{E} = 0 \quad 1-6-a$$

$$\mu\varepsilon \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} - \Delta \vec{H} = 0 \quad 1-6-b$$

Cette équation de propagation lie des opérateurs spatiaux à des opérateurs temporels pour caractériser la *dispersion du milieu*.

I-2-2 Classification des matériaux en fonction de leurs permittivité et perméabilité

En électromagnétisme, tout matériau homogène peut être décrit par ses paramètres constitutifs que sont la permittivité et la perméabilité [5].

Les caractéristiques de propagation des ondes électromagnétiques diffèrent suivant le milieu environnant, comme l'illustre la figure (1-1).

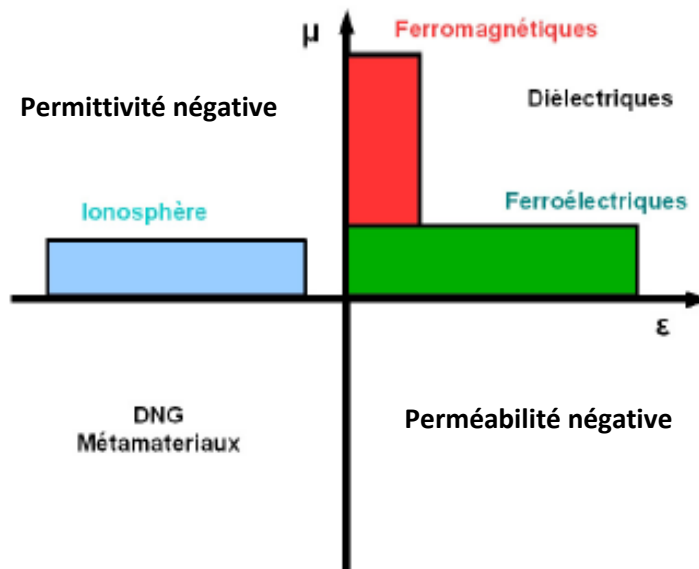


Figure 1-1 : Représentation des matériaux en fonction des parties réelles de leurs paramètres constitutifs.

En effet, les propriétés de transmission classique sont obtenues pour des valeurs de permittivité relative ε_r et de perméabilité relative μ_r positives. Dans ce cadran, les matériaux présentant une forte constante diélectrique ou une forte constante magnétique sont respectivement les ferroélectriques et les erromagnétiques. Dans ce cas, le vecteur d'onde \vec{k} et le vecteur de Poynting \vec{S} sont colinéaires et de même sens et le trièdre formé par les vecteurs \vec{E} , \vec{H} et \vec{k} est direct. La propagation est alors de type main droite, comme représenté sur la figure (1-2) (a) [7].

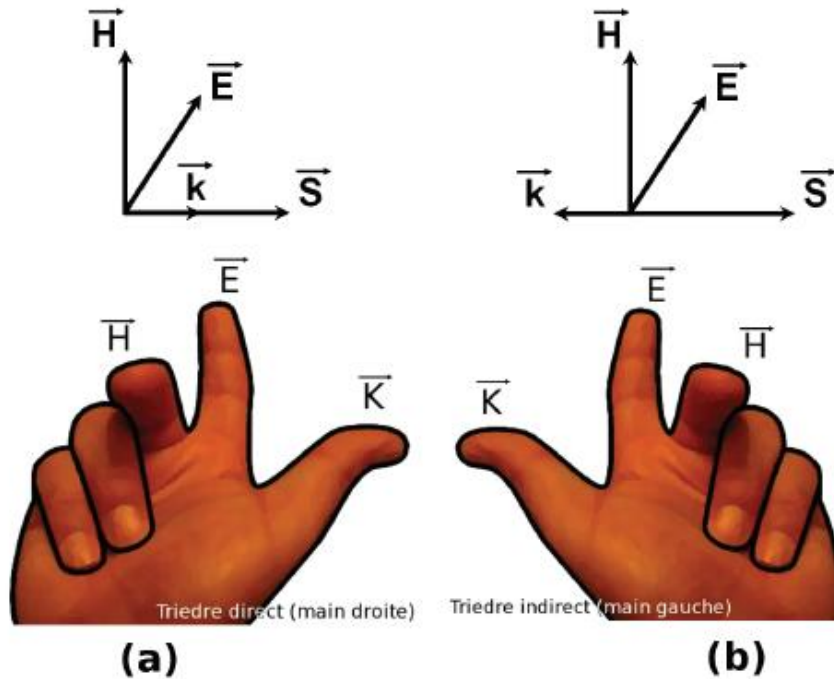


Figure 1-2 - (a) Cas correspondant à une propagation main droite et (b) main gauche.

En électromagnétisme classique, les ondes se propagent dans un milieu doublement positif correspondant au premier cadran de la figure (1-1). On parle dans ce cas de milieu main droite dans la mesure où la propagation peut être décrite par le trièdre direct avec les vecteurs champs électrique et magnétique et le vecteur d'onde dans le prolongement des trois doigts de la main droite. L'onde qui se propage dans le vide, présente des valeurs de ϵ_r et μ_r égales à 1 et la plupart des milieux de propagation auront des paramètres constitutifs relatifs du même ordre de grandeur. A titre d'exemple, les polymères fréquemment utilisés comme matériau diélectrique ont des permittivités relatives voisines de 2. En revanche, cette valeur est plus élevée dans le cas des semi-conducteurs non dopés (de l'ordre de 10). Des valeurs de ϵ_r bien plus importantes, de l'ordre de plusieurs milliers, peuvent être obtenues pour des matériaux ferroélectriques tels que le $B_aS_rT_iO_3$ (BST). La perméabilité des céramiques ferromagnétiques telles que les ferrites vaut quelques unités pour des fréquences supérieures au gigahertz et peut dépasser plusieurs milliers à basse fréquence.

Le quatrième cadran regroupe les milieux à permittivité relative négative. Il est connu que la ionosphère, qui se comporte comme un plasma, présente des valeurs de ϵ_r inférieures à zéro. De la même manière, J. B. Pendry [2] a proposé de substituer au métal un réseau de fils métalliques afin d'abaisser la fréquence plasma qui se traduit par des perméabilités négatives très importantes par effet de dilution. Ceci revient à définir un milieu effectif dont le comportement reste régi par la loi de Drude, avec une valeur de fréquence plasma essentiellement liée aux paramètres géométriques du réseau. Cette possibilité permet de disposer d'une plage fréquentielle de fonctionnement très large associée à un niveau de perte relativement faible jusqu'aux frontières de l'infrarouge. En effet, l'onde se propage entre les fils qui, en micro-ondes, peuvent être assimilés à des conducteurs parfaits. Du point de vue de la transmission, en considérant le champ électrique

parallèle à l'orientation des fils, le comportement observé est de type passe-haut avec une fréquence de coupure qui correspond à la fréquence plasma.

Le troisième cadran regroupe les matériaux à perméabilité négative. Des valeurs négatives de perméabilité peuvent être observées dans certains alliages .

La perméabilité négative est obtenue par magnétisme artificiel sur des motifs d'anneaux fendus qui seront appelés par la suite Split Ring Resonators (SRR) ,excité par un champ magnétique parallèle à son axe , la caractéristique typique de ce phénomène en fonction de la fréquence suit une évolution de Lorentz (Figure I-3) ou ω_0 correspond à la pulsation de résonance pour laquelle la perméabilité effective devient négative et repasse par zéro à la pulsation ω_{mp} désignée comme la pulsation plasma magnétique. par analogie avec la pulsation plasma électrique .Lorsque l'on s'éloigne de cette résonance , la perméabilité effective tend vers zéro.

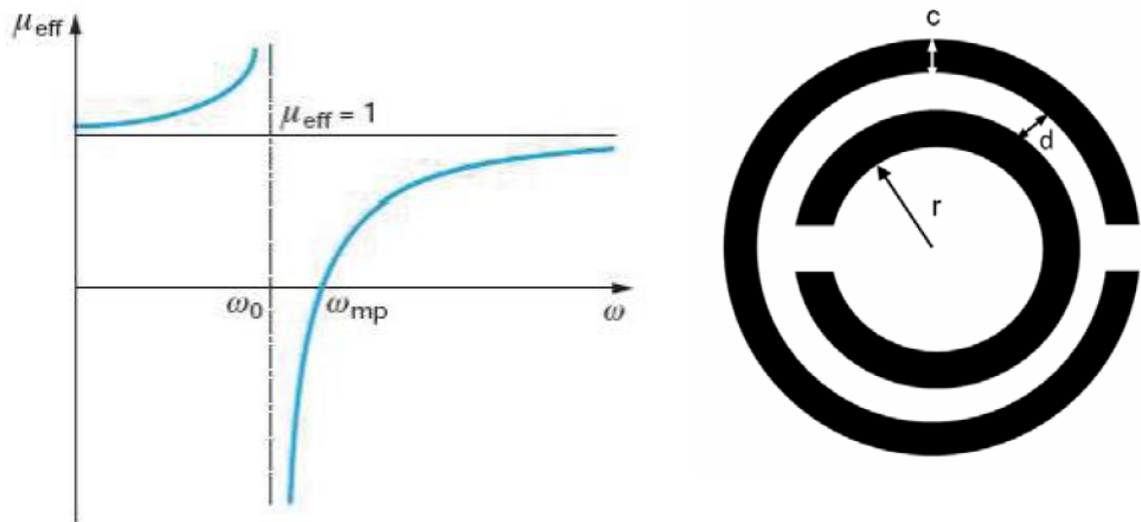


Figure I-3 : évolution typique de la perméabilité effective (partie réelle) d'un résonateur en anneau fendue (SRR) en fonction de la pulsation présenté a gauche .

En 2001, le groupe de D.R.Smith [8] a effectué la première démonstration expérimentale d'un phénomène de réfraction négative en superposant des réseaux de fils et de boucle de courant. D'un point de vue fondamental, l'utilisation des résonateurs fendus peut être étendue jusqu'au domaine de l'optique. Toutefois, à ces longueurs d'onde, les dispositifs souffrent de pertes relativement importantes. Par ailleurs, on observe un phénomène d'inertie des porteurs de charge qui entraîne une saturation de la réponse magnétique des résonateurs [5].

I-3 Modélisation analytique

Dans la littérature, les réponses électrique et magnétique d'un matériau peuvent être généralement décrites par les modèles de Drude et de Lorentz [9].

D'après Drude on a :

$$\varepsilon(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + j.\omega_c)} \quad 1-7$$

D'après Lorentz on a :

$$\mu(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2 - \omega_0^2}{\omega(\omega + j.\omega_c) - \omega_0^2} \quad 1-8$$

Avec :

ω_p : fréquence plasma

ω_c : la fréquence de collision (modélise la dissipation d'énergie)

ω_0 : la fréquence de résonance à laquelle à lieu le maximum d'absorption

La fréquence plasma peut être écrite en fonction des paramètres de la structure :

$$\omega_p = \frac{c_0}{a \sqrt{2\pi \ln\left(\frac{a}{r}\right)}} \quad 1-9$$

On a aussi :

$$\omega_0 = \frac{2\varepsilon_0 a^2 \omega_p^0}{r^2 \sigma^2} \quad 1-10$$

D'autres relation théoriques ont été proposées par la suite pour la fréquence de plasma d'un réseau de tiges métallique :

D'après Sarychev : [10]

$$\omega_p = \frac{c_0}{a \sqrt{2\pi \ln\left(\frac{a}{\sqrt{2}r}\right) + \frac{\pi}{2} - 3}} \quad 1-11$$

D'après Maslovski : [11]

$$\omega_p = \frac{c_0}{a \sqrt{2\pi \ln\left(\frac{a^2}{4r(a-r)}\right)}} \quad 1-12$$

Pour les résonateurs en anneau fendue (SRR) on a aussi : [12]

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{3dc_0}{\pi^2 r^3}} \quad 1-13$$

L'expression (1-7) montre que la permittivité du métal tend vers 1 lorsque la fréquence tend vers l'infini. Compte tenu de l'importance de ω_p par rapport à ω_c on peut considérer que la fréquence plasma correspond au passage de la permittivité par zéro. En dessous de cette valeur, ε est négatif. Cette évolution de la permittivité peut être mise à profit pour synthétiser un milieu simplement négatif.

La figure (1-4) montre l'évolution de la permittivité complexe de l'or en fonction de la fréquence pour les fréquences inférieures à la fréquence plasma ω_p , la partie réelle de la permittivité complexe est négative, s'accompagnant par un pic de la partie imaginaire dans les fréquences les plus basses. Les métaux se comportent donc comme des réflecteurs en dessous de leur fréquence plasma. Une des applications résultant de cet effet est l'établissement de liaisons radio longues distances en réfléchissant les ondes sur certaines couches de l'ionosphère

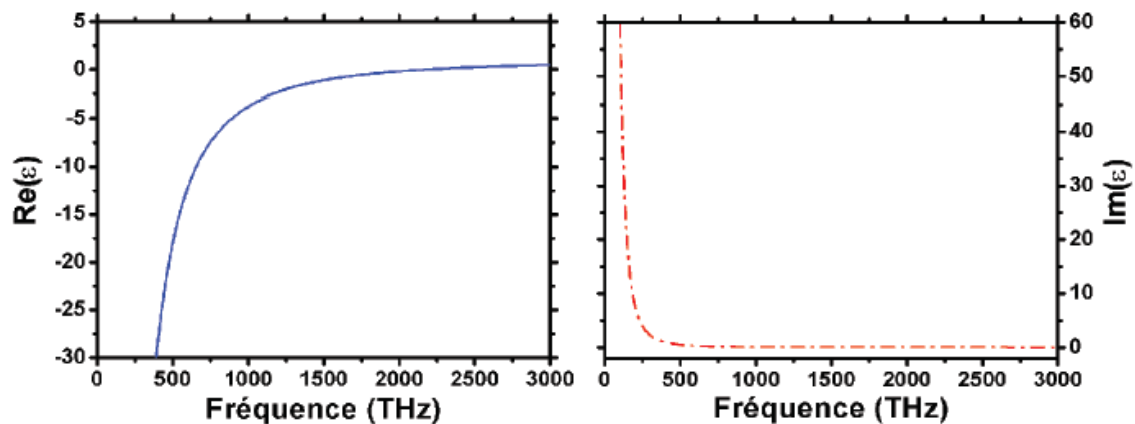


Figure 1-4 : Evolution de la permittivité complexe de l'or suivant le modèle de Drude ($\omega_p = 2175$ THZ, $\omega_c = 6,5$ THZ).

On peut considérer qu'un métamatériau constitué d'une association d'un réseau de fils et d'un réseau de résonateurs en anneaux peut être décrit électriquement par un modèle de Drude et magnétiquement par le modèle de Lorentz.

On peut alors définir une fréquence plasma électrique ω_{pe} équivalente pour ε et une fréquence plasma magnétique ω_{pm} équivalente pour μ ainsi qu'une fréquence de résonance ω_0 .

A partir d'une géométrie appropriée des éléments constitutifs, il est alors possible d'identifier les bandes main gauche et d'adapter les trois pulsations aux valeurs désirées. Notons que le domaine d'homogénéisation est en général situé en deçà des pulsations plasma équivalentes. Ceci est illustré sur la figure (1-5) pour des valeurs de fréquences adimensionnées. Les parties réelles de ε et μ sont simultanément négatives dans l'intervalle (2,4),

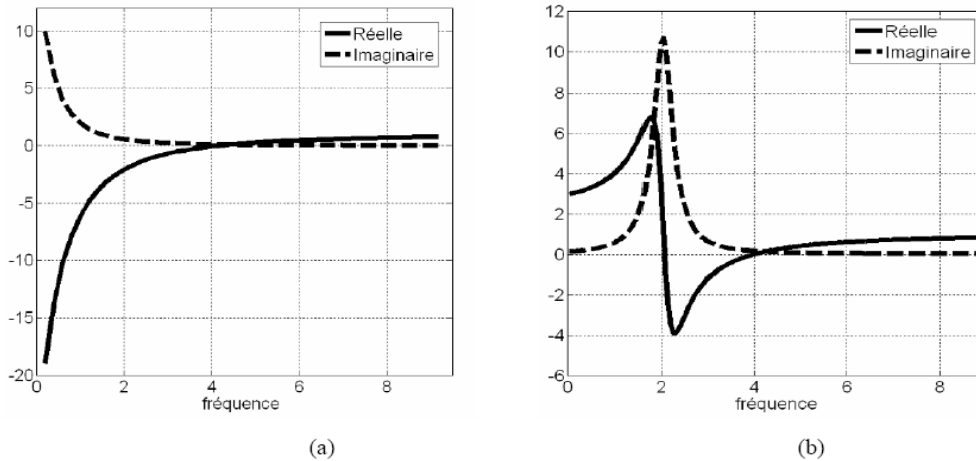


Figure 1-5 : Illustration des modèles de dispersion (a) Drude, (b) Lorentz pour une fréquence plasma $\omega_p = 5$, $\omega_c = 0.5$ une fréquence de résonance $\omega_0 = 3$.

La figure 1-6 illustre l'évolution de l'indice de réfraction déduit des valeurs de ϵ et μ précédentes. On observe effectivement que l'indice est négatif dans la plage (2,4) pour des valeurs d'indice en valeur réelle allant de -2.8 à 0.

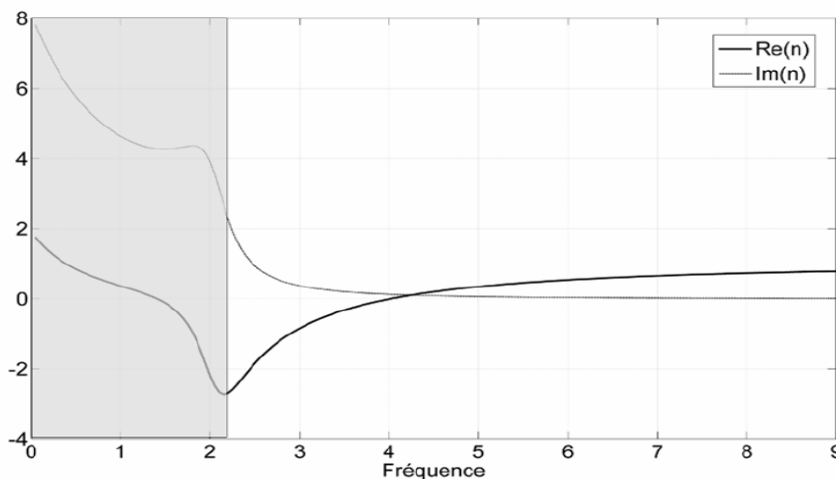


Figure 1-6 : Exemple d'indice de réfraction d'un métamatériau composé d'anneaux et de fils. La permittivité suit le modèle de Drude, la perméabilité suit le modèle de Lorentz. ϵ et $\mu < 0$ pour une fréquence comprise entre 2.3 et 4.1.

les métamatériaux se présentent généralement comme des réseaux périodiques et il suffit de connaître les propriétés d'une cellule élémentaire pour déduire celle de l'ensemble. A partir de la structure de bande associée, plusieurs bandes soit main droite, main gauche ou interdite peuvent être identifiées. En simulant ensuite un réseau fini.

Les comportements se révèlent complexes en fonction de la fréquence, mais les métamatériaux représentent un véritable moyen appréhender les phénomènes de réfraction négative. Ils font d'ailleurs l'objet d'études extensives des micro-ondes à l'infrarouge, mais peinent à atteindre actuellement le domaine de l'optique. C'est pourquoi dans cette gamme de fréquence, les cristaux photoniques apparaissent comme une alternative intéressante. Les cristaux photoniques sont des matériaux artificiels dont l'indice de réfraction est modulé périodiquement

dans l'espace et dont les caractéristiques de dispersion peuvent être exploitées pour générer un indice de réfraction négatif [3].

I-4 Réfraction négatif

Le travail précurseur de V. G. Veselago [1], publié en 1968, a montré qu'un milieu doublement négatif pouvait être décrit par un indice de réfraction négatif. Cette hypothèse a été vérifiée, environ 30 ans plus tard, par la démonstration expérimentale de D. R. Smith [8]. Cette première expérience de réfraction a été largement reprise par différents groupes de recherche comme outil de description qualitatif et quantitatif. D'un point de vue théorique, la réfraction négative est décrite par la loi de Snell-Descartes énoncée par la relation suivante:

$$n_1 \sin \theta_i = n_2 \sin \theta_t \quad 1-9$$

où n_1 et n_2 sont les indices de réfraction des milieux 1 et 2 respectivement et θ_1, θ_2 , l'angle de réfraction par rapport à la normale de leur plan de jonction.,

La valeur absolue de l'indice de réfraction qui, par convention, associe la vitesse de phase se manifestant du vide vers un milieu donné est:

$$n = \frac{c_0}{v} \quad 1-10$$

$$\text{Or } v = v_p = \frac{c_0}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r}} \quad 1-11$$

donc:

$$n = n_p = \sqrt{\epsilon_r \mu_r} \quad 1-12$$

Cet indice est aussi appelé indice de phase car il est lié à la vitesse de phase par les relations:

$$v_p = \frac{c_0}{|n_p|} = \frac{\omega}{k} \quad 1-13$$

De la même manière, il est possible de définir un indice de groupe n_g

$$n_g = \frac{c_0}{|v_g|} = c_0 \frac{\partial \omega}{\partial k} \quad 1-14$$

Notons que dans un milieu non dispersif, l'indice de groupe est constant et qu'il est égal à l'indice de réfraction. Par contre, pour les milieux périodiques structurés qui sont dispersifs, par définition n_g varie et ne peut être utilisé pour caractériser le matériau et définir les propriétés de réfraction [1,7].

I-5 Focalisation

La possibilité de réfracter une onde avec un angle négatif signifie que l'on peut également focaliser une onde à l'aide d'une lentille plane (figure I-6a). De plus, J. B. Pendry [2] a montré qu'il était envisageable de descendre sous la limite de diffraction de Rayleigh, autrement dit de focaliser une image avec une résolution inférieure à la demi-longueur d'onde. Ce phénomène est justifié par l'amplification des ondes évanescentes à l'intérieur du milieu doublement négatif

(figures I-7b et I-7c) De cette démonstration théorique est né le concept de superlentille.

Malgré le grand intérêt suscité par cette découverte, on relève à ce jour peu de démonstrations expérimentales en raison des contraintes qu'implique sa mise en œuvre pratique. Tout d'abord, le principe de focalisation tel qu'illustré par la (figure I-7a) sous-entend de travailler avec un indice de réfraction à l'intérieur de la lentille exactement opposé à celui de l'environnement extérieur. Si ces indices ne sont pas égaux en valeur absolue, on n'obtient pas de point focal à l'intérieur de la lentille. Concrètement, si la lentille est interfacée avec l'air, son indice de réfraction doit être égal à -1. De plus, pour limiter les réflexions aux interfaces, il est impératif de respecter la condition d'adaptation d'impédance. Par conséquent, les paramètres effectifs de la lentille doivent respecter les deux équations suivantes:

$$n = -\sqrt{\mu_{eff} \epsilon_{eff}} = -1 \text{ et } z = \sqrt{\frac{\mu_{eff}}{\epsilon_{eff}}} = 1$$

où z est l'impédance réduite. Cela implique que les permittivités et perméabilités effectives valent toutes deux -1. Enfin, pour les applications en focalisation, la condition d'anisotropie du milieu est primordiale. Ces difficultés expliquent pourquoi, jusqu'à présent, la plupart des démonstrations expérimentales de superlentille utilisent des cristaux photoniques, qui à défaut de travailler en régime de métamatériau, offrent certaines facilités de conception notamment au niveau du critère d'isotropie ($\lambda = 1.5 \mu m$).

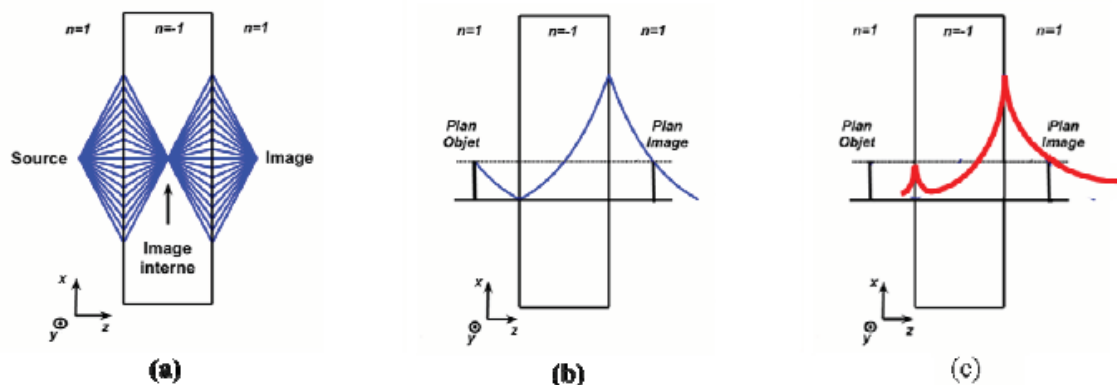


Figure 1-7: Illustrations des propriétés de la superlentille (a) focalisation, (b) et (c) amplification des ondes évanescentes. [5]

I-6 Les cristaux photoniques

1-6-1 Définition

Un cristal photonique (CP) est un matériau diélectrique où l'indice de réfraction est périodiquement modulé. Il s'agit d'un cristal car le matériau est constitué par un arrangement périodique de briques élémentaires diélectriques d'indice de réfraction n_1 dans une matrice d'indice de réfraction n_2 . Le terme photonique est ajouté car, la périodicité étant de l'ordre de la longueur d'onde de la lumière, un CP permet de moduler la propagation des photons. Le concept de cristal photonique a été proposé en 1987 par E. Yablonovitch [13] et S. John [14].

1-6-2 Caractéristiques

Un CP est caractérisé par plusieurs paramètres:

- **La dimensionnalité:**

Celle-ci est déterminée par la périodicité de l'indice de réfraction. Comme le montre la **Figure 1-8**, la périodicité d'un CP peut s'étendre à une, deux ou trois dimensions (1, 2, 3D). Un exemple de CP 1D est un empilement alterné selon un axe de couches d'indices de réfraction différents. Un CP 2D peut être réalisé par un réseau périodique de cylindres de même indice de réfraction dans une matrice d'indice de réfraction différent. Enfin l'arrangement de tiges inclinées et imbriquées forme un CP où l'indice de réfraction varie périodiquement selon les trois directions de l'espace.

- **La symétrie:**

La position des briques d'un CP détermine la symétrie du réseau. Par exemple, pour un CP 3D de particules sphériques une symétrie cubique, hexagonale compacte (hc) ou cubique à face centrée (cfc) peut être obtenue.

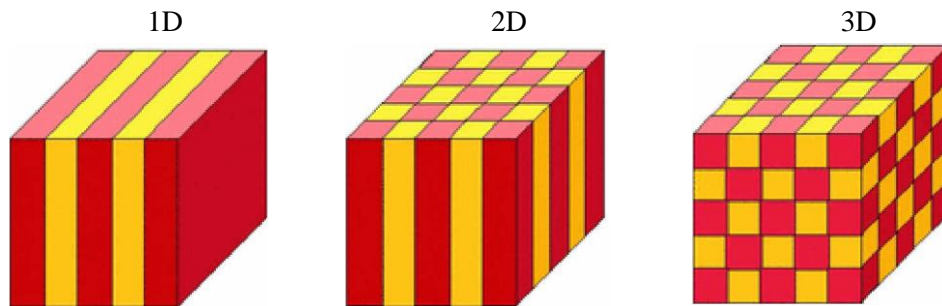


Figure 1-8. Représentations schématiques de CP où l'indice de réfraction varie périodiquement suivant une, deux ou trois dimensions. Les zones rouges et jaunes représentent des régions d'indices de réfraction différents.

- **Le paramètre du réseau**

C'est la distance fondamentale entre deux briques constitutives. Il détermine la région spectrale où le CP interagit avec l'onde électromagnétique.

- **Le contraste d'indice de réfraction**

Ce paramètre est défini comme le rapport n_1/n_2 entre les indices de réfraction des briques et de la matrice. Il offre une idée générale de la force de diffusion des deux matériaux composants du CP.

1-7 Notion de bande interdite photonique

Une analogie entre le comportement des électrons dans un cristal semi-conducteur et le comportement des photons dans un CP peut être établie. Dans un semi-conducteur, la variation périodique du potentiel d'interaction entre électrons et atomes fait que les électrons n'ont accès qu'à certains niveaux d'énergie, des bandes d'énergie permises, séparées entre elles par des bandes d'énergies interdites. Ce concept de bandes permises et interdites peut être étendu au comportement des photons dans un CP. A cause de la variation périodique de l'indice de réfraction n dans un CP, l'énergie des photons est quantifiée en bandes permises et en bandes interdites, appelées aussi gaps.

Les bandes permises et interdites d'un CP se regroupent dans un diagramme de bandes photoniques, qui est une représentation des fréquences possibles pour l'onde électromagnétique au sein du CP en fonction de son vecteur d'onde (sa direction de propagation au sein du cristal). Afin d'expliquer le concept de diagramme de bandes photoniques, prenons le cas d'un CP 2D constitué par un réseau de cylindres dans une symétrie cubique (Figure 1-9).

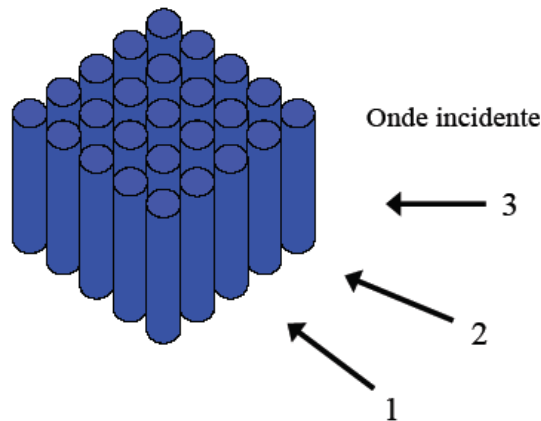


Figure 1-9 Schéma d'un CP 2D constitué par un réseau de cylindres dans une symétrie cubique et des différentes directions de propagation de l'onde incidente considérées dans les figures suivantes.

A deux dimensions, les cristaux photoniques sont composés d'un réseau périodique de piliers de diélectrique dans l'air ou de trous d'air percés dans un diélectrique. Les deux réseaux les plus courants pour l'organisation des piliers (ou des trous) sont le réseau carré et le réseau triangulaire (ou hexagonal). La Figure 1-10 présente ces deux réseaux avec leurs zones de Brillouin respectives. Pour un réseau carré de période a , la première zone de Brillouin est un carré de cote $2\pi/a$. Par des considérations de symétrie (le carré possédant 4 axes de symétrie principaux), on peut montrer que la zone de Brillouin irréductible est un triangle rectangle isocèle de sommets Γ, X, M . Pour le réseau triangulaire, le réseau réciproque est aussi un réseau triangulaire. Sa zone de Brillouin irréductible est un triangle rectangle de sommets Γ, K, M . Dans les deux cas, il suffit de suivre l'évolution du vecteur d'onde k sur les trois cotés du triangle pour atteindre les extrema de $\omega(k)$. On peut alors tracer le diagramme de bande $\omega = f(k)$ qui représente les variations des fréquences permises dans le réseau en fonction de la projection du vecteur d'onde suivant les directions de haute symétrie de celui-ci [15].

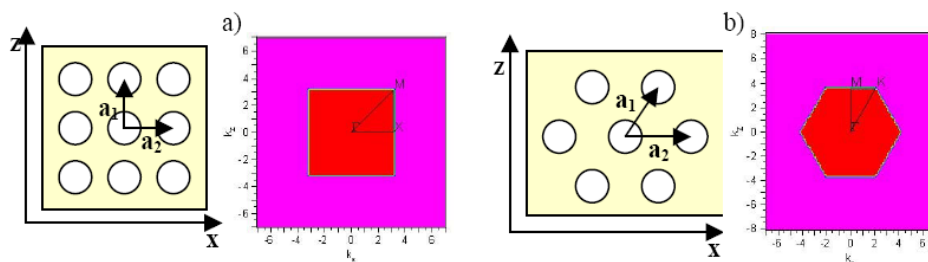


Figure 1-10 : a) Réseau carré et sa zone de Brillouin associée et b) Réseau triangulaire et sa zone de Brillouin associée

La partie gauche de la Figure 1-11a, montre le diagramme de bandes du CP pour une certaine direction de propagation de la lumière. Nous pouvons distinguer deux bandes permises (courbe noire et rouge). L'onde électromagnétique pourra se propager dans le CP comme dans un milieu diélectrique homogène, si son énergie est contenue dans ces bandes permises. Ces deux bandes permises sont séparées par une bande interdite (région grise) où aucune fréquence n'est autorisée. Si l'énergie de l'onde incidente est comprise dans cette bande interdite, alors l'onde est alors diffusée de manière cohérente aux interfaces entre les régions d'indices de réfraction différents du CP. On dit qu'elle est diffractée par le CP. Ce phénomène, qui satisfait la condition de diffraction de Bragg, est à l'origine des irisations des opales naturelles.

Expérimentalement, une bande interdite est mise en évidence en mesurant la réponse du matériau soumis à un faisceau lumineux, en transmission ou en réflexion. Cette dernière est caractérisée par l'apparition d'un minimum de la transmission, respectivement un maximum de la réflexion, comme le montre la partie droite de la Figure 1-11a.

Dans le cas d'un CP caractérisé par un contraste d'indice faible, la position spectrale d'une bande interdite dépend de la direction de propagation de l'onde incidente. Pour s'en convaincre, la **Figure 1-11b** montre le diagramme de bande du même CP mais pour trois directions de propagation de l'onde incidente différentes (référéncées par 1, 2, 3). La bande interdite précédemment observée pour la direction 1 se déplace vers des fréquences plus grandes dans le cas de la direction 2, alors qu'une seconde bande interdite apparaît pour une gamme de fréquences différentes dans le cas où l'onde incidente pénètre dans le CP dans la direction 3.

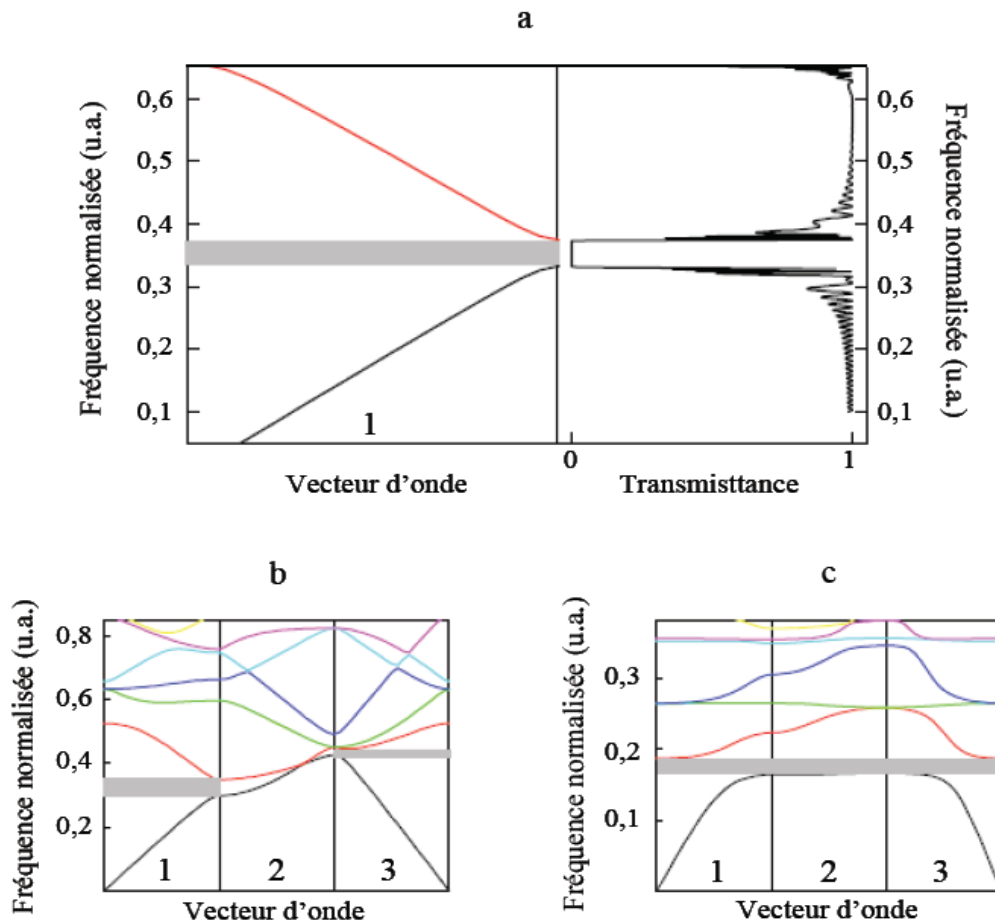


Figure 1-11 a) Comparaison du diagramme de bandes du CP caractérisé par un contraste d'indice de réfraction égal à 1,5 (calculé par la méthode de l'approximation d'onde scalaire) avec sa réponse optique en transmission calculée par la méthode des matrices de transfert. pour la direction de propagation 1. Diagrammes de bandes du même CP de contraste d'indice de réfraction égal à $n=2$ (b) et $n=6$ (c) pour trois directions de propagation de l'onde incidente différentes.

En revanche, dans le cas d'un CP présentant une symétrie cristalline adaptée, un contraste d'indice de réfraction suffisamment élevé et constitué de briques élémentaires de forme appropriée, les bandes interdites peuvent devenir assez larges et se recouvrir pour une certaine gamme de fréquence (Figure 1-11c). La propagation de la lumière est de la sorte interdite dans le matériau pour ces fréquences, selon toutes les directions de l'espace. On parle alors de bande interdite photonique complète. Pour cette gamme d'énergie, la densité d'état photonique est nulle dans le matériau. Il se comporte comme un miroir parfait.

1-8 Applications

La capacité des CP à manipuler, confiner et contrôler la lumière dans les trois directions de l'espace suscite de nombreuses applications. Celles-ci se situent principalement dans les domaines de l'informatique et de la communication, avec la fabrication de dispositifs reproduisant les principes opérationnels des différents composants d'un circuit intégré, en utilisant les photons comme porteur d'information à la place des électrons. La lumière a en effet plusieurs avantages par rapport aux électrons. Elle peut voyager dans un matériau diélectrique plus rapidement qu'un électron dans un fil métallique; elle peut porter une grande quantité d'information par seconde; les interactions entre photons et matériau

diélectrique sont moins importantes que celles entre électrons et matériau métallique, ce qui réduit les pertes d'énergie.

Les CPs ont été proposés pour contrôler l'émission spontanée de la lumière. Considérons qu'une entité photosensible, enfouie dans un CP, soit excitée. La transition électronique vers un niveau d'énergie plus bas ne pourra pas se faire aisément, si la fréquence du photon émis est contenue dans la bande interdite photonique complète. Le temps de vie de l'état excité pourra alors être augmenté et la vitesse d'émission spontanée modifiée [16].

Chapitre 2 :
Les Méthodes Numériques
Et
Outils de simulation

2-1 Introduction

Avec l'évolution rapide des moyens informatiques et des logiciels de calcul scientifique, les méthodes numériques ont pris une part prédominante dans la résolution des problèmes électromagnétiques. Dans ce domaine nous pouvons classer les méthodes en deux groupes : d'une part, celles qui, comme la méthode des moments (MM), ne nécessitent pas le maillage de l'espace entourant l'objet et, d'autre part, celles qui, comme la méthode des différences finies dans le domaine temporel (FDTD : finite difference time domain), et la méthode des éléments finis (FE : finite element), qui nécessitent un maillage de l'espace.

Dans le cas de la méthode des moments, la prise en compte de l'espace libre entourant l'objet analyse est en principe parfaite. Ce type de méthode pose néanmoins des problèmes difficiles à résoudre dans le cas d'un milieu fortement hétérogène. Les méthodes FDTD ou FE utilisent les équations de Maxwell dans l'espace entièrement discrétisé. Un avantage notable de ces méthodes réside dans le fait qu'elles sont à même de prendre en compte des structures fortement hétérogènes. Cependant leur problème principal est lié à la taille du maillage de l'espace. De multiples études ont été menées pour tenter de remédier à ce problème. Ainsi de nombreuses méthodes (Mur, Berenger) [17] ont permis de réduire, sans perte sensible de précision, l'espace à discrétiser [4].

2-2 Méthode des ondes planes

La méthode des ondes planes était la première méthode utilisée pour la détermination des modes propres et du diagramme de dispersion des structures périodiques de dimensions infinies inspirée de la méthode de calcul de bande utilisée en physique du solide pour les matériaux à bande interdite électronique. Elle est basée sur la décomposition de la permittivité et des ondes de Bloch sur une base de Fourier utilisant les vecteurs réciproques du cristal [18].

Cette méthode est l'une des méthodes les plus employées aujourd'hui pour résoudre des équations aux dérivées partielles, et notamment les équations de Maxwell qui régissent les phénomènes électromagnétiques. Elle est basée sur la technique d'approximation par éléments finis qui permet d'approcher une fonction polynôme dans un espace donné à partir de la connaissance des valeurs en certains noeuds du domaine. Il faut pour cela diviser le domaine d'étude de ces fonctions en sous-domaines élémentaires appelés éléments. Ces fonctions locales ont l'avantage d'être plus simple que celles que l'on pourrait éventuellement utiliser pour représenter la totalité du domaine de calcul. Grâce à la diversité des éléments pouvant être employés, notamment les triangles en 2D ou les tétraèdres en 3D, cette méthode est très répandue pour la modélisation de géométries complexes. Le caractère répétitif de la méthode qui consiste à appliquer le même opérateur sur chaque élément a rendu cette méthode très efficace. Cette méthode exige un traitement particulier des équations qui sont transformées à l'aide d'une formulation intégrale, puis discrétisées pour aboutir à un système d'équations algébriques. La méthode est robuste mais nécessite généralement des moyens de calculs importants.

La méthode FE utilise une approximation par parties de la fonction inconnue, pour résoudre une équation différentielle. L'équivalence physique peut être utilisée pour trouver une solution de l'équation aux dérivées partielles. Cependant, la complexité des géométries des systèmes considérés, rend très

difficile, voire impossible, de trouver une approximation de la solution dans l'ensemble du domaine étudié. Pour contourner cette difficulté, on subdivise le domaine en sous-domaines appelés éléments finis, sur lesquels on effectue localement une interpolation pour approcher la fonction inconnue. Le domaine considéré est limité par une frontière où la valeur du potentiel est supposée connue. Les éléments finis qui sont utilisés pour discrétiser le domaine sont généralement regroupés en familles topologiques : segments, triangles, quadrilatères, tétraèdres, parallélépipèdes, prismes (Figure 2-1). Chaque élément est représenté par des points appelés noeuds géométriques. A chaque élément, on associe des noeuds d'interpolation où l'inconnue sera calculée. Ainsi, à chaque élément résultant de la subdivision, la fonction modélisant le phénomène est définie par une interpolation polynomiale.

$$V = \sum_{i=1}^N \lambda_i V_i \quad 2-1$$

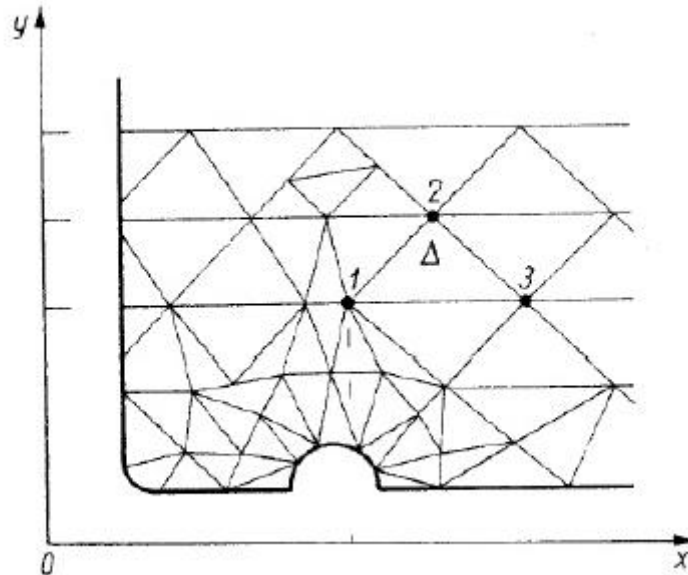


Figure 2.1 – Fragment du champ avec le maillage destiné aux calculs par la méthode des éléments finis [4].

N est le nombre de noeuds d'interpolations ; λ_i sont les fonctions d'interpolation et V_i les valeurs nodales.

Le principe de base consiste à trouver la distribution des valeurs nodales ; λ_i qui vérifient les équations aux dérivées partielles et qui remplissent les conditions aux limites. Ceci peut être effectué soit par une méthode variationnelle qui minimise une fonction équivalente au problème différentiel posé, ou en utilisant une méthode de projection comme la projection de Galerkin qui traite directement l'équation aux dérivées partielles. L'ordre du polynôme dépend du type d'élément ; par exemple, pour un élément quadratique unidimensionnel décrit par l'abscisse curviligne μ située dans l'intervalle $[-1, 1]$, les fonctions d'interpolation sont :

$$\begin{aligned}\lambda_1(\mu) &= \frac{1}{2}\mu(\mu-1) \\ \lambda_2(\mu) &= 1-\mu^2 \\ \lambda_3(\mu) &= \frac{1}{2}\mu(\mu+1)\end{aligned}\quad 2-2$$

Considérons par exemple, l'équation de Poisson. Nous cherchons une approximation V' de V qui minimise la quantité R :

$$R = (\Delta V' + \frac{\rho}{\epsilon_0 \epsilon}) \quad 2-3$$

où ρ est la densité volumique de charge.

Parmi les méthodes permettant d'annuler une quantité donnée dans un domaine Ω , la méthode des résidus pondérés est souvent utilisée. On choisit un système de fonctions linéaires indépendantes W_n , appelées fonctions de projection, puis on annule toutes les intégrales (2-4) à chaque élément fini.

$$I_n = \int_{\Omega} W_n R d\Omega \quad 2-4$$

On obtient ainsi une formulation intégrale de la méthode des éléments finis. Il existe également des sous-méthodes de la méthode des résidus pondérés (collocation point par point, collocation par sous-domaines, Galerkin, moindres carrés), selon le choix des fonctions pondérées.

La méthode de Galerkin est la plus utilisée. Elle consiste à prendre les mêmes expressions mathématiques des fonctions de projection et d'interpolation:

$$\lambda_i(\mu) = W(\mu) \quad 2-5$$

Pour chaque élément, on annule les N intégrales (2-4) correspondant aux N fonctions de projection. Ce système d'équations peut s'écrire sous une forme matricielle :

$$A_e \vec{V}_e = \vec{b}_e \quad 2-6$$

avec A_e étant la matrice associée à l'élément considéré, dont les coefficients dépendent des coordonnées des noeuds de l'élément. Les composantes de V_e sont les inconnues aux noeuds du même élément. Les vecteurs b_e prennent en compte les conditions aux limites éventuelles en certains noeuds de l'élément considéré. En écrivant l'équation (2-6) pour tous les éléments, on obtient une série d'équations algébriques parmi lesquelles la solution de potentiel dans le domaine étudié [4, 19].

2-2-1 Application aux matériaux composites

La méthode FE a été largement utilisée pour la modélisation des matériaux composites aléatoires ou périodiques, linéaires ou non linéaires, avec ou sans pertes que se soit dans les cas 2D ou 3D. Cette méthode a été employée par divers auteurs pour le calcul de la permittivité effective complexe de matériaux composites à partir de la résolution de l'équation de Laplace et l'utilisation de conditions aux limites appropriées.

Considérons en premier lieu, le cas d'une structure périodique sans perte. Soit un composite diélectrique périodique à deux phases contenant une inclusion de forme arbitraire dans une matrice. En prenant en compte les propriétés de symétrie et de périodicité, la géométrie du matériau est réduite à une cellule élémentaire comme le montre la Fig. (2-2), qui est assimilé à un condensateur plan-plan.

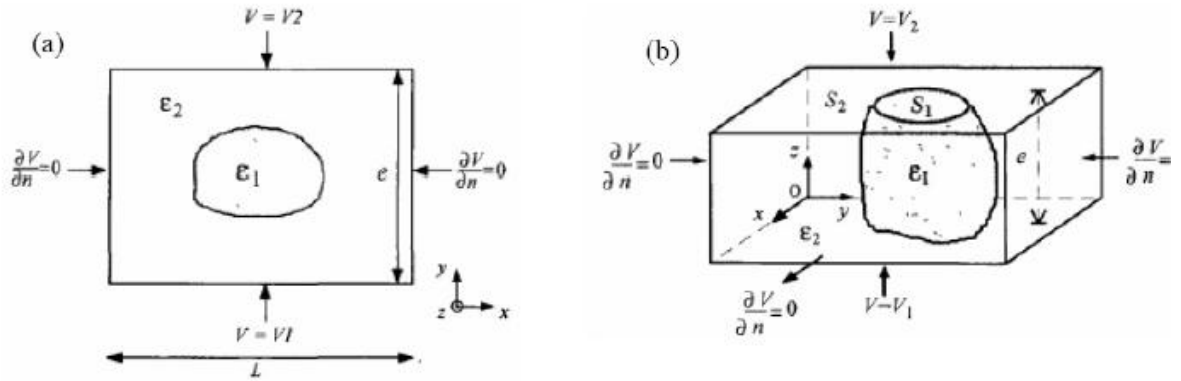


Figure 2-2 – Modélisation d'un composite périodique : (a) 2D, (b) 3D

Le calcul de la permittivité effective des structures composites 2D procède en trois étapes :

1-définition des cellules élémentaires contenant une grille de points permettant une bonne approximation du domaine spatial . L'espace est rempli de l'arrangement désiré, c'est à dire les permittivités effective des cellules sont égales à ϵ_1 ou ϵ_2 selon que la cellule est remplie de la phase 1 ou de la phase 2 .

2-calcul de la distribution du potentiel local à l'intérieur de Ω où il n'y a ni charges libres, ni courants, obtenue par la résolution de l'équation (2-7).

$$\vec{\nabla} \cdot (\epsilon(r) \vec{\nabla} V(r)) = 0 \tag{2-7}$$

où $\epsilon(r)$ et $V(r)$ désignent la permittivité et le potentiel locaux.

L'énergie électrostatique peut être calculée à partir des valeurs des dérivées du potentiel V aux noeuds du maillage sur toute la surface S du composite à l'aide de l'équation :

$$E_e = \frac{1}{2} \iint_S \epsilon(x, y) \left[\left(\frac{\partial V}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial y} \right)^2 \right] dx dy \tag{2-8}$$

La permittivité effective dans la direction du champ électrique appliqué, c'est à dire $\epsilon = \epsilon_y$, est obtenue par la condition de continuité de la composante normale du vecteur déplacement électrique via :

$$\int_s \epsilon_1 \left(\frac{\partial V}{\partial n} \right) = \epsilon \frac{V_2 - V_1}{L} S \tag{2-9}$$

où $V_2 - V_1$ représente la différence de potentiel imposé dans la direction y , L est l'épaisseur du composite dans la même direction et S désigne la "surface" de

la cellule unité qui est perpendiculaire au champ appliqué. Le potentiel sur le haut de la structure est fixé à $V_2 = 1V$, alors que sur l'autre face V_1 est pris à $0V$.

3-génération automatique ou semi-automatique du maillage

L'interaction d'un champ électromagnétique avec un matériau diélectrique homogène et isotrope peut être caractérisé par une permittivité (relative) décrite par un nombre complexe : $\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon''$. Le calcul de ε' et ε'' se généralise aisément à partir de l'évaluation précédente de ε de la façon suivante :

Pour un milieu diélectrique, les solutions numériques du problème électrostatique sont basés dans le cas général sur la résolution de l'équation de Poisson

$$\vec{\nabla} \cdot (\varepsilon \vec{\nabla} V) = -\rho \quad 2-10$$

Si le milieu est conducteur, sans charges libres, ni sources, la solution du problème est donnée par la résolution de

$$\vec{\nabla} \cdot (\sigma \vec{\nabla} V) = 0 \quad 2-11$$

avec σ définissant la conductivité du milieu. Lorsque le milieu considéré est intermédiaire entre les deux cas limites considérés précédemment (milieu avec pertes diélectriques), alors la solution du problème dépend du temps, et est donnée par un potentiel électrique complexe qui satisfait l'équation de continuité :

$$\vec{\nabla} \cdot (\sigma \vec{\nabla} V) + \vec{\nabla} \cdot \left(\frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon \vec{\nabla} V) \right) = 0 \quad 2-12$$

Ou de façon équivalente dans l'espace de Fourier (en prenant un potentiel harmonique proportionnel à $\exp(j\omega t)$), en considérant un milieu sans charges libres, par :

$$\vec{\nabla} \cdot (j\varepsilon_0 \varepsilon(\omega) \vec{\nabla} V) = 0 \quad 2-13$$

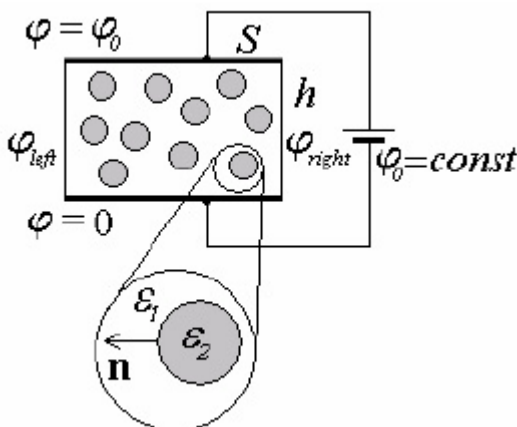


Figure 2-3 – Principe du calcul de la permittivité effective d'un composite aléatoire.

L'équation (2-13) est analogue à l'équation (2-7) en posant $\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon''$ avec $\varepsilon'' = \frac{\sigma}{\omega\varepsilon_0}$. Myroshnychenko et Brosseau [20,21] ont développé une approche plus générale permettant l'évaluation de la permittivité effective complexe d'une structure hétérogène aléatoire en couplant une analyse FE de cette structure avec un code de type Monte Carlo qui permet de générer différents types de désordre dans la structure (Fig.2-3).

2-2-2 Maillage

La génération d'un maillage de haute qualité joue un rôle crucial dans l'analyse par éléments finis. Celle-ci est faite par l'utilisation du code de calcul .Le calcul du champ par un logiciel permet la génération contrôlée des mailles d'élément finis par l'utilisation des fichiers d'entrée contenant des instructions complètes avec des caractéristiques de maille de noeud-par-noeud et d'élément-par-élément. Il permet d'obtenir un maillage à la fois suffisamment fin pour garantir la qualité de la convergence et suffisamment réduit pour obtenir des résultats avec des ressources et un temps limités.

Le maillage des surfaces constitue une des étapes essentielles dans la modélisation des matériaux hétérogènes. Cette étape fait passer les surfaces de l'état de contour à l'état de surfaces élémentaires. Rappelons qu'il est possible d'utiliser un meilleur manuel, où les surfaces sont maillées soit au coup par coup, c'est à dire, surface après surface, soit toutes à la fois. Le maillage est ensuite affiné en propageant une ou plusieurs lignes de maillage et/ou en divisant les éléments du maillage. A titre d'exemple, la Fig. (2.4, resp. 2.5) représente le maillage avec des cellules unité en 2D avec une inclusion isolées de type fractal (triangle de Sierpinski)

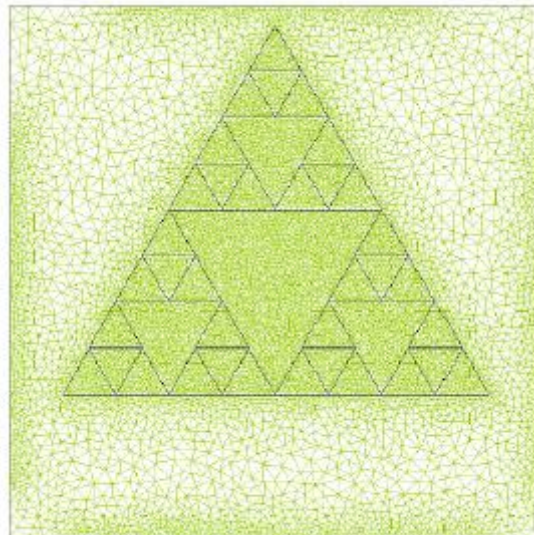


Figure. 2-4 – Maillage des cellules unité en 2D avec une inclusion de type triangle de Sierpinski [4].

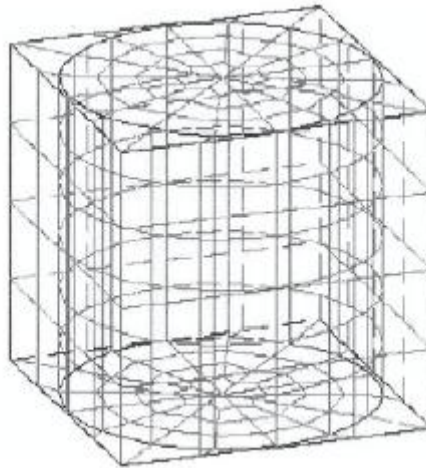


Figure. 2-5– Maillage des cellules unité en 3D avec une inclusion cylindrique de hauteur finie. [4]

2-3 Méthode des différences finies temporelles (FDTD)

La méthode FDTD (Finite Difference Time Domain) a été initialement proposée par Kane S. Yee en 1966 [22] pour résoudre les problèmes impliquant les équations de Maxwell dans les milieux isotropes avec les conditions aux limites. Il a développé les premiers algorithmes de calcul concernant l'approche temporelle. Elle a été ensuite appliquée aux cristaux photoniques. La méthode FDTD permet une résolution numérique des équations de Maxwell par une fine discrétisation spatio-temporelle. L'espace est divisé en cellules élémentaires (mailles élémentaires). Elle possède de nombreux avantages [23,24]:

- Le calcul de toutes les composantes de champs à tous les instants et sur tout le domaine de calcul permet d'obtenir de nombreuses informations, grâce à l'utilisation de la transformée de Fourier. Elle est particulièrement intéressante pour connaître la réponse spectrale d'un système [25,26].

- La possibilité de donner des résultats précis même sur les structures à fort contraste d'indice comme les cristaux photoniques.

- La résolution des équations dans le domaine temporel, permet d'appréhender visuellement la propagation d'une onde électromagnétique dans un matériau périodique. Cela a permis d'étudier l'évolution de la transmission et de la réflexion à l'intérieur du cristal photonique à étudier.

- L'étude de réseaux de taille finie grâce aux conditions aux limites absorbantes ou bien de réseau de taille infini en utilisant les conditions de mur magnétique ou de mur électrique [27].

- La possibilité d'intégrer dans l'algorithme de résolution de nombreuses sources (ondes planes, modes guidés, ...)[18].

2-3-1 Principe de la méthode

La méthode FDTD se fonde sur la résolution directe des équations de Maxwell dans la structure étudiée. Nous considérons dans la suite, un milieu homogène, isotrope, non dispersif, sans source et transparent caractérisé par une permittivité (relative) ε et une perméabilité magnétique (relative) μ réelles. Les

équations différentielles de Maxwell-Faraday et de Maxwell-Ampère sont définies dans le domaine temporel par :

$$\vec{\text{rot}} \overleftarrow{H} = \frac{\partial(\varepsilon \vec{E})}{\partial t} \quad 2-14$$

$$\vec{\text{rot}} \overleftarrow{E} = -\frac{\partial(\mu \vec{H})}{\partial t} \quad 2-15$$

où \vec{E} et \vec{H} désignent les champs électrique et magnétique, respectivement. En projetant les équations (2-14) et (2-15) dans un repère Cartésien (O, x, y, z), on obtient :

$$\frac{\partial H_x}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial E_y}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial y} \right) \quad 2-16$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial E_z}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial z} \right) \quad 2-17$$

$$\frac{\partial H_z}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial E_x}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial x} \right) \quad 2-18$$

$$\frac{\partial E_x}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z} \right) \quad 2-19$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{\partial E_x}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial x} \right) \quad 2-20$$

$$\frac{\partial E_z}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y} \right) \quad 2-21$$

Pour résoudre ce système d'équations, on applique la méthode des différences finies. La démarche consiste à évaluer chaque dérivée spatiale et temporelle des six composantes des champs. De plus, la réduction de ce système dans le plan (x y) permet de découpler ce système en deux sous-systèmes indépendants. L'un fait intervenir les composantes du champ magnétique du plan (H_x, H_y) et la composante normale au plan (E_z); l'autre fait intervenir les composantes du champ électrique du plan (E_x, E_y) et la composante normale au plan (H_z). Le premier cas se réfère au mode TM (transverse magnétique) et le second cas se réfère au mode TE (transverse électrique) [4].

La réduction de ce système dans un plan (x, y) permet de le découpler en deux sous systèmes indépendants :

1) En mode TM (transverse magnétique), le système fait intervenir les composantes (E_x, E_y, H_z) :

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial E_x}{\partial t} &= \frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z} \right) \\ \frac{\partial E_y}{\partial t} &= \frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{\partial E_x}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial x} \right) \\ \frac{\partial H_z}{\partial t} &= \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial E_x}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial x} \right) \end{aligned} \right\} \quad 2-22$$

1) En mode TE (transverse électrique), le système fait intervenir les composantes (H_x, H_y, H_z) :

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial H_x}{\partial t} &= \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial E_y}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial y} \right) \\ \frac{\partial H_y}{\partial t} &= \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial E_z}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial z} \right) \\ \frac{\partial E_z}{\partial t} &= \frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y} \right) \end{aligned} \right\} \quad 2-23$$

Le développement limité de Taylor au deuxième ordre nous permet d'obtenir les dérivées temporelles et spatiales des fonctions (E_x, E_y, H_z) et (H_x, H_y, H_z) . Rappelons brièvement cette discrétisation en utilisant une fonction f à une seule variable u .

Supposons que f est continue et connue aux points $u_1 = u_0 - \alpha$ et $u_2 = u_0 + \alpha$ (figure 2-6). Il est possible d'évaluer numériquement la dérivée de f en u_0 en utilisant un développement limité de Taylor aux points u_1 et u_2 .

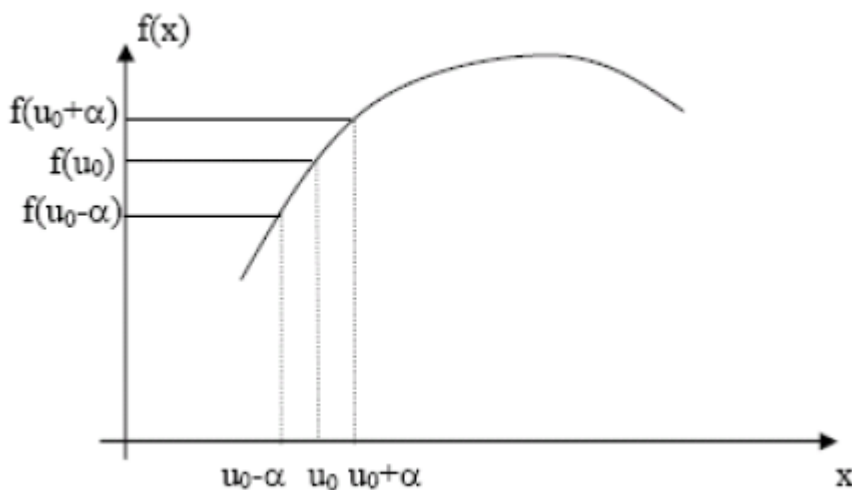


Figure 2-6 : Calcul de la dérivée de $f(x)$ en u_0

Ce qui donne :

$$f(u_a - \alpha) = f(u_a) - \alpha \frac{\partial f}{\partial u}(u_0) + \frac{\alpha^2}{2!} \frac{\partial^2 f}{\partial u^2}(u_0) - \dots + \frac{\alpha^i}{i!} \frac{\partial^i f}{\partial u^i}(u_0)$$

2-24

Et :

$$f(u_a + \alpha) = f(u_a) + \alpha \frac{\partial f}{\partial u}(u_0) - \frac{\alpha^2}{2!} \frac{\partial^2 f}{\partial u^2}(u_0) + \dots - \frac{\alpha^i}{i!} \frac{\partial^i f}{\partial u^i}(u_0)$$

2-25

La dérivée de f au point u0 est approchée de manière centrée en calculant la différence entre les équations (3-24) et (3-25) à l'ordre 2, comme suit :

$$\frac{\partial f}{\partial u}(u_0) = \frac{f(u_0 + \alpha) - f(u_0 - \alpha)}{2\alpha} + \theta(\alpha^2) \quad 2-26$$

Cette solution génère une erreur d'ordre 2 ($\theta(\alpha^2)$). beaucoup plus intéressante qu'une erreur d'ordre 1.

2-3-2 Discrétisation des équations de Maxwell et algorithme de Yee

L'algorithme de Yee [18] utilise un maillage spatial où chaque composante du champ \vec{E} est entourée par 4 composantes du champ \vec{H} , et inversement. L'espace est divisé en cellules élémentaires parallélépipédiques, à l'intérieur desquelles sont calculées les 6 composantes orthogonales des champs électromagnétiques.

La forme des équations de Maxwell permet de calculer le champ électrique au milieu des arêtes des mailles. Les composantes du champ magnétique sont déterminées au centre des faces (figure 2-7).

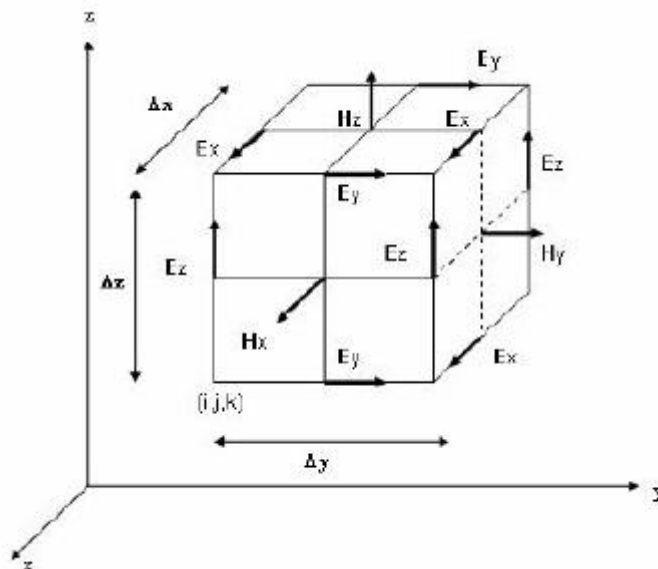


Figure 2-7 : Cellule cubique de yee

L'espace 3D est discrétisé par un maillage de pas $\Delta x = \Delta y = \Delta z = \Delta$, où Δ représente le pas de discrétisation dans l'espace, et Δt celui du temps.

Les champs électriques et magnétiques seront évalués respectivement aux instants $n.\Delta t$. et $(n + 1/2).\Delta t$ avec n un entier naturel. Les discrétisations spatiales des composantes du champ électrique et magnétique seront décalées de $\Delta / 2$ (figure 2-8).

Les équations finales discrétisées sur cet espace et dans le temps permettent de calculer la valeur d'une composante de champs en un point de la grille à un instant $t + \Delta t$ en fonction de :

- □ cette même composante au temps précédent t
- □ des valeurs de champs voisines (4 composantes E si on calcule une composante H mais seulement 2 composantes H si on calcule une composante E), calculées au temps $t - \Delta t / 2$ (Figure 2-9).

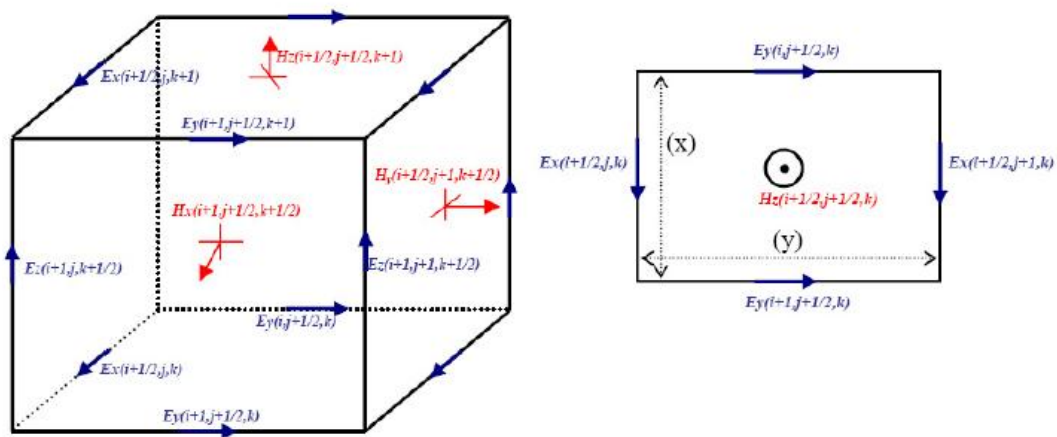


Figure. 2-8 – Cellule de Yee (discrétisation spatiale) à trois (à gauche) et à deux (à droite) dimensions.

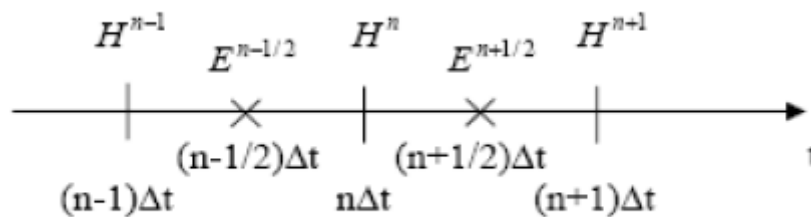


Figure 2-9 : Décomposition numérique du calcul

Les différentes composantes des champs à l'instant t sont évaluées en fonction de ces mêmes composantes à l'instant $t - \Delta t$ et des composantes de champ voisines ($t - \Delta t / 2$), (Figure. 2-8).

L'évolution du champ électromagnétique en fonction du temps est donc déterminée en chaque point du réseau par un processus itératif. En partant de :

$$\frac{\partial H_z}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial E_x}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial x} \right)$$

A l'aide des équation suivantes :

$$\frac{\partial H_z}{\partial t} = \frac{H_z^{n+\frac{1}{2}}(i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}) - H_z^{n-\frac{1}{2}}(i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2})}{\Delta t} \quad 2-27$$

$$\frac{\partial E_x}{\partial y} = \frac{E_x^n(i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}) - E_x^n(i+\frac{1}{2}, j)}{\Delta y} \quad 2-28$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial x} = \frac{E_y^n(i, j+\frac{1}{2}) - E_x^n(i+1, j+\frac{1}{2})}{\Delta y} \quad 2-29$$

$$H_z^{n+\frac{1}{2}}(i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}) = H_z^{n-\frac{1}{2}}(i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}) + \frac{\Delta t}{\mu(i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2})\Delta} \left[E_x^n(i+\frac{1}{2}, j+1) - E_x^n(i+\frac{1}{2}, j) + E_y^n(i, j+\frac{1}{2}) - E_x^n(i+1, j+\frac{1}{2}) \right] \quad 2-30$$

Le calcul des deux composantes de \vec{E} se fera de la manière que précédemment, ce qui nous donne :

$$E_z^{n+1}(i+\frac{1}{2}, j) = E_z^n(i+\frac{1}{2}, j) + \frac{\Delta t}{\varepsilon(i+\frac{1}{2}, j)\Delta} \left[H_z^{n+\frac{1}{2}}(i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}) - H_z^{n+\frac{1}{2}}(i+\frac{1}{2}, j-\frac{1}{2}) \right] \quad 2-31$$

$$E_y^{n+1}(i, j+\frac{1}{2}) = E_y^n(i, j+\frac{1}{2}) + \frac{\Delta t}{\varepsilon(i, j+\frac{1}{2})\Delta} \left[H_z^{n+\frac{1}{2}}(i-\frac{1}{2}, j) - H_z^{n+\frac{1}{2}}(i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}) \right] \quad 2-32$$

2-3-3 Algorithme FDTD

L'algorithme du programme FDTD [4] présenté ci-dessous figure 2-10, permet de comprendre comment le décalage temporel entre le champ électrique et magnétique est pris en compte. Concrètement, l'évaluation du champ magnétique a lieu entre deux calculs du champ électrique. Comme nous l'avons déjà évoqué précédemment.

Initialement toutes les composantes du champ électromagnétique sont nulles, sauf Hz au centre de la cellule qui modélise une source ponctuelle. Cette source entraîne une variation du champ électrique. Ainsi l'onde électromagnétique se propage de proche en proche dans tout le volume de calcul.

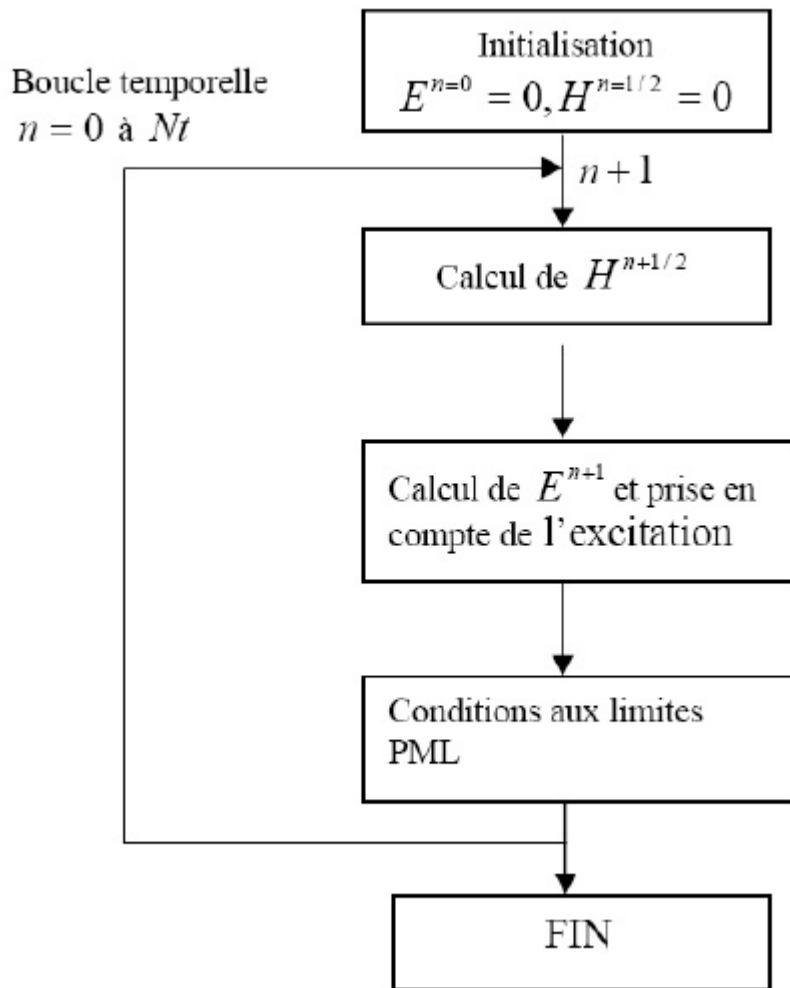


Figure 2-10 : Organigramme de l'algorithme de calcul des champs par FDTD

3-3-4 Condition de stabilité

Comme tous les schémas explicites, le schéma de Yee est soumis à une condition de stabilité fixant le pas temporel à partir de la discrétisation initiale de l'espace de simulation. Les problèmes de stabilité des méthodes numériques explicites ont été analysés en détail par Courant, Friedrich et Lewy (CFL)[28], ainsi que par Von Neumann, à partir d'une approche mathématique rigoureuse. Taflove [29] a notamment appliqué l'approche de type CFL à la méthode FDTD.

Le critère CFL donné par l'inégalité (2-33), permet de palier à la divergence des calculs engendrée par l'approximation des dérivées.

$$\Delta t \leq \frac{1}{c \sqrt{(1/\Delta x)^2 + (1/\Delta y)^2 + (1/\Delta z)^2}} \quad 2-33$$

avec $c = 310^8 \text{ m/s}$ désignant la vitesse de propagation de l'onde électromagnétique dans le vide.

Dans le cas d'un maillage uniforme $\Delta x = \Delta y = \Delta z = \Delta$ l'inégalité (2-33), se réduit à :

$$\Delta t \leq \frac{1}{c} \frac{\Delta}{\sqrt{3}} \text{ à 3D} \quad 2-34$$

$$\Delta t \leq \frac{1}{c} \frac{\Delta}{\sqrt{2}} \text{ à 2D} \quad 2-35$$

Ce critère de stabilité reste adéquat pour la plupart des milieux (diélectrique, magnétique, dispersif, avec ou sans pertes), car la vitesse de phase est inférieure à c dans ces milieux. Cette condition se comprend assez intuitivement : il faut que le pas temporel soit suffisant pour permettre de décrire la propagation de l'onde d'un noeud au noeud le plus proche distant de Δ . Plus le maillage spatial sera fin et plus le nombre d'itérations pour décrire un temps T de propagation sera important.

3-3-5 Dispersion numérique

La numérisation des équations de Maxwell introduit une dispersion appelée dispersion numérique. Cela s'exprime par le fait que les signaux numériques se propagent au cours du temps, dans le domaine de calcul, avec des vitesses de phase et de groupe différentes suivant leur fréquence mais aussi suivant leur direction de propagation par rapport aux axes du repère Cartésien. Les erreurs de dispersion numérique croissent lorsque la fréquence des signaux augmente et quand la taille du domaine de calcul augmente, ce qui rend les résultats de simulation de moins en moins fiables. Elles peuvent apparaître sous diverse formes : erreur de phase, déformation des signaux, perte en amplitude, élargissement des impulsions [30].

2-4 Outils de simulation

2-4-1 La structure périodique bidimensionnelle

Ces structures périodiques sont composées de cylindres diélectriques. Elles présentent une relative simplicité géométrique qui facilitent les études théoriques et expérimentales.

Les structures périodiques bidimensionnelles sont périodiques suivant deux directions de l'espace et infinies suivant la troisième.

Il existe deux types de structures périodiques diélectriques :

- Les structures dites «connectées» (figure 2-11) : les motifs élémentaires sont d'indice n_1 inférieur à l'indice n_2 de la matrice diélectrique.

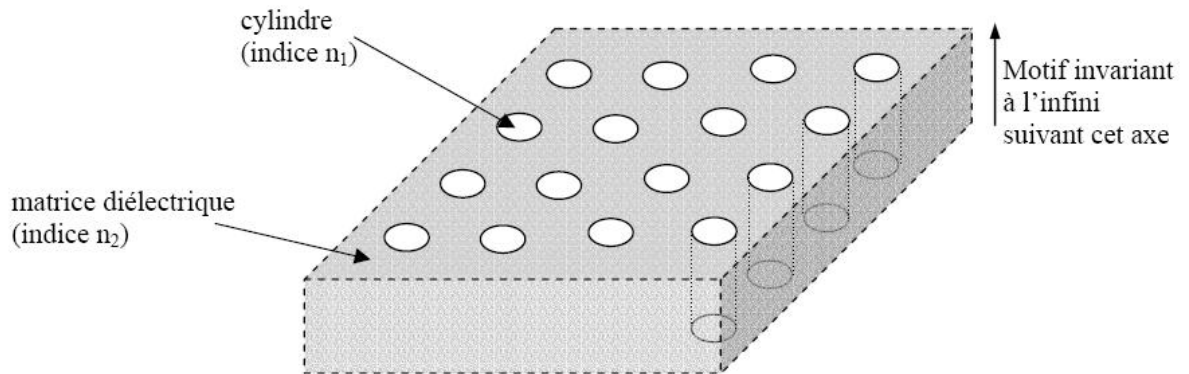


Figure 2-11 : Structure périodique 2D connectée

- Les structures dites « déconnectées » (Figure 2-12) : les motifs élémentaires sont d'indice n_1 supérieur à l'indice n_2 de l'espace inter motifs. Elles sont constituées de tiges diélectriques ou métalliques alignées périodiquement dans l'air ou de la mousse.

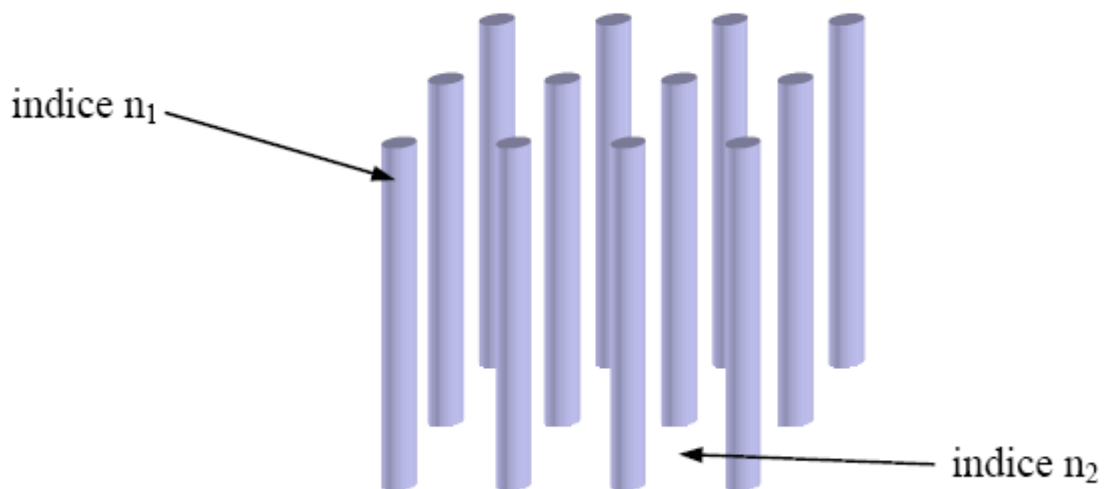


Figure 2-12 : Structure périodique 2D déconnectée [30]

2-5 Méthode de calcul

Pour calculer les structures de bandes de matériaux périodiques bidimensionnels, nous utilisons la méthode de décomposition en ondes planes. Indiquons que dans ce cadre, nous travaillons sur des cristaux photoniques constitués de matériaux sans pertes d'indice, de permittivité et de perméabilité réelles.

La méthode de la décomposition en ondes planes permet un calcul rapide des courbes de dispersion. Elle s'applique sur toutes les structures dont la constante diélectrique est périodique. Les équations de Maxwell sont représentées dans le domaine fréquentiel puis transformées en un problème aux valeurs propres. Les

champs électrique E et magnétique H sont ainsi développés en une somme d'ondes planes.

L'équation résultante aux valeurs propres est alors résolue sur la maille élémentaire du cristal.

2-6 Polarisation Transverse Electrique (TE) et Transverse Magnétique (TM)

Dans le cas de structures de périodicité 2D, on peut décomposer l'ensemble des modes de propagation suivant deux classes de polarisation découplées : TE et TM. Leurs principales caractéristiques sont détaillées dans le tableau de la figure 2-13.

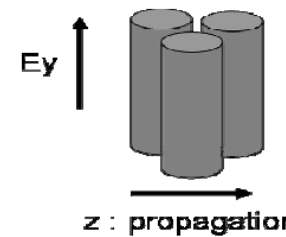
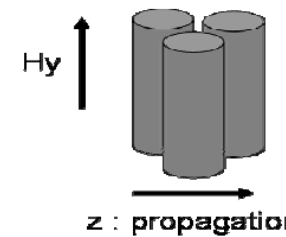
Mode	TM	TE
Distribution du champ		
Composantes	E_y, H_x, H_z	H_y, E_x, E_z

Figure 2-13 : Récapitulatif des propriétés des modes d'un CP 2D.

2-7 Réseau réciproque et zone de Brillouin

Pour le calcul du diagramme de bande constitué de l'ensemble des courbes $\omega(k)$ du cristal photonique, il est possible de considérer l'ensemble des vecteurs constituant la première zone de Brillouin réduite. La zone de Brillouin est un sous-espace de l'espace réciproque défini par la maille primitive, dite de Wigner-Seitz, dans l'espace des vecteurs d'onde k .

Ainsi, le réseau de CP 2D à maille carrée est décrit dans l'espace réciproque par une zone de Brillouin carrée alors que le réseau triangulaire par une zone hexagonale. Par symétrie, on peut encore réduire dans l'espace réciproque, l'intervalle d'étude minimale pour restituer l'ensemble des propriétés du cristal à la « zone de Brillouin réduite ». Ces caractéristiques sont résumées dans le tableau de la figure 2-14 pour les deux réseaux. La zone réduite est référencée par les points de haute symétrie Γ, X et M pour la maille carrée et Γ, K et M pour la maille triangulaire.

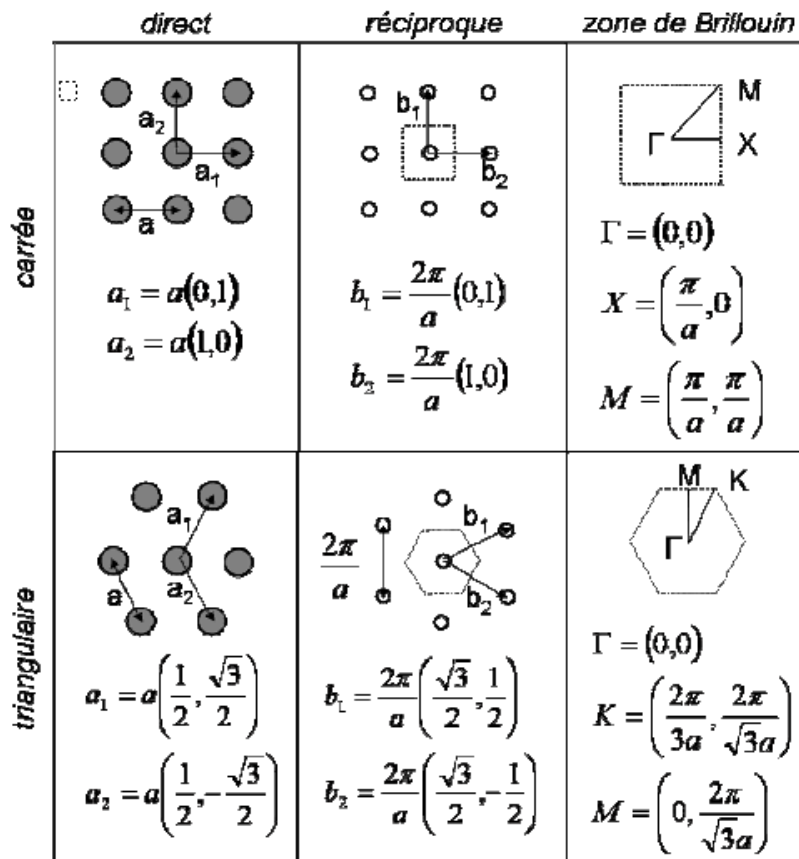


Figure 2-14 : Représentation du réseau carré et triangulaire de période a dans l'espace direct et réciproque correspondant. La zone de Brillouin réduite est décrite par les points de haute symétrie.

2-8 Diagramme de bande :

L'utilisation de la méthode des ondes plane qui est un outil numérique permettant de calculer les bandes de fréquences autorisées ou interdites des ondes électromagnétiques susceptible de se propager dans le matériau considéré comme milieu propageant et ceci pour n'importe quelle direction .

Cette méthode nous permet d'obtenir des diagrammes de dispersion comme présenté dans la Figure 2-15.

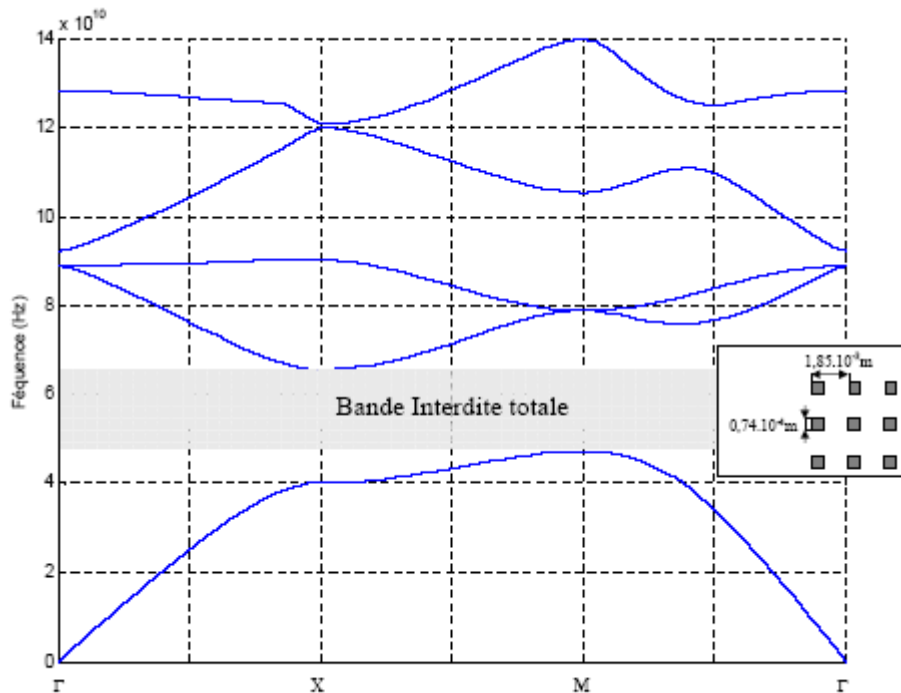


Figure 2-15 : Digramme de bande d'un cristal BIP 2D

ce diagramme représente :

-En abscisse, le parcours fait par le vecteur d'onde lorsqu'il décrit le contour formé par les points de haute symétrie Γ, X, M de la première zone de Brillouin.

-En ordonnée, la fréquence des modes calculés.

Pour chaque vecteur d'onde du contour, il existe plusieurs fréquences correspondant aux différents modes de propagation susceptible de se propager dans le cristal photonique. En fonction de ce calcul, nous pouvons alors déterminer la ou les bandes interdites du matériau. En considérant toutes les directions possibles, nous pouvons alors avoir une bande interdite totale lorsque deux modes ne sont pas sécants. C'est cette bande de fréquence qui est caractéristique des matériaux à bande interdite photonique [30].

2-8 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les principes de base des deux méthodes numériques (FDTD, FE) pour la modélisation des cristaux photoniques qui vont nous permettre d'évaluer l'influence de la géométrie, sur les propriétés de polarisation électrique de divers types de matériaux hétérogènes. Pour la FDTD La simplicité qui comporte le coeur de l'algorithme de résolution et les équations de base, la rendent très accessible et compréhensible. Le calcul de toutes les composantes de champs à tous les instants et sur tout le domaine de calcul permet d'obtenir de nombreuses informations précises. On peut aussi obtenir des spectres en divers points de la structure ainsi que des cartes de champs à partir de la propagation d'un seul pulse temporel. Elle permet l'utilisation de sources des profils spatiaux (ondes planes, sources ponctuelles) et des profils temporels (harmoniques, impulsions).

En suite nous avons dressé un aperçu sur les différents outils pour la modélisation numérique, comme les diagrammes de bandes et la zone de Brillouin et ces points de haut symétrie.

Deuxième partie :
Simulations Numériques

Chapitre 3 : l'approche métallique

3-1 Introduction

Dans cette partie du chapitre nous allons proposer des motifs métalliques comme les tiges métalliques qui vont être simulées suivant le modèle de Drude pour avoir une permittivité négative et des résonateurs à anneaux fendues (SRR), et avoir une perméabilité négative suivant le modèle de Lorentz [9,31,32,33].

Pour cela on a conçu un modèle numérique, c'est-à-dire un code Matlab qui nous permet de simuler les différents motifs en variant les paramètres du motif afin de voir l'influence de chaque paramètre sur la permittivité et la perméabilité et les converger vers l'application désirée, pour notre étude et d'avoir $\varepsilon = -1$ et $\mu = -1$ pour la réalisation d'une lentille parfaite.

3-2 Etude paramétrique des différents motifs présentant une ε et μ négatives

Pour notre étude le métal choisie est l'or qui présente une résistivité de $3.67E+7 \text{ s}\cdot\text{m}^{-1}$, $\omega_p = 5E+14 \text{ Hz}$.

Les tiges utilisés ont un rayon r espacées périodiquement d'une période a , l'autre motif le SRR est constitué de deux anneaux imbriqués de rayon r et d la distance entre les deux anneaux.

Nous allons d'abord fixer un intervalle pour r et faire varier chaque fois le pas a et faire suivre l'évolution des ces paramètres par le code Matlab qui nous donne les résultats ci-dessous.

On a choisi l'intervalle du pas a de : 150nm à 1000nm, avec un pas de 150nm.

Pour le rayon r de : 1nm à 100nm, avec un pas de 20nm.

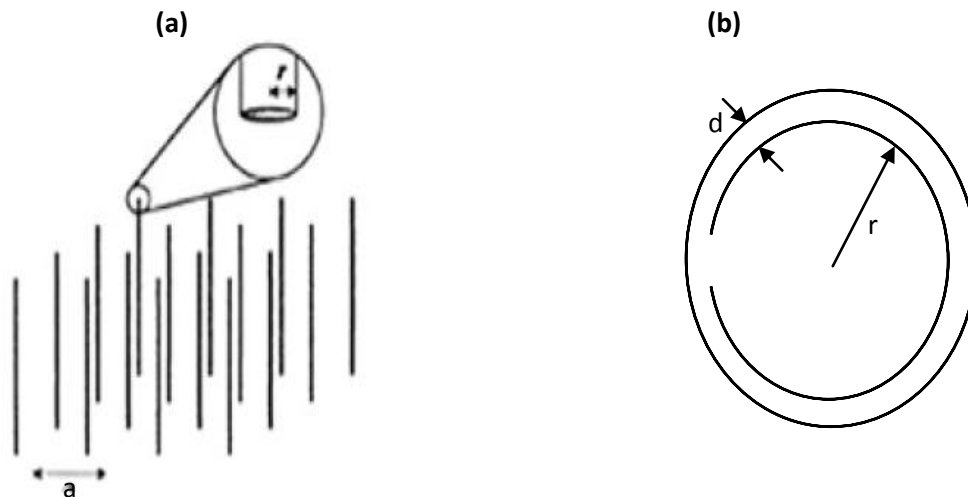


Figure 3-1: (a) Tiges de rayons r espacées périodiquement d'une période a .

(b) Schéma d'un SRR (Split Ring Resonator).

3-3 Etude paramétrique d'une tige métallique

3-3-1 Permittivité suivant Drude (Annex1)

a	MAX ε	MIN ε
1,50E-07	-2,37E-02	-2,99957152
r(nm)	ω (HZ)	ε
2,10E-08	4,95E+14	-1,01764175
4,10E-08	7E+14	-2,83435938

a	MAX ε	MIN ε
3,00E-07	-1,43E-02	-2,98910716
r(nm)	ω (HZ)	ε
2,10E-08	2,4E+14	-1,03917321
4,10E-08	4,75E+14	-1,03176315
6,10E-08	7,00E+14	-1,08574346
8,10E-08	6,65E+14	-2,98910716

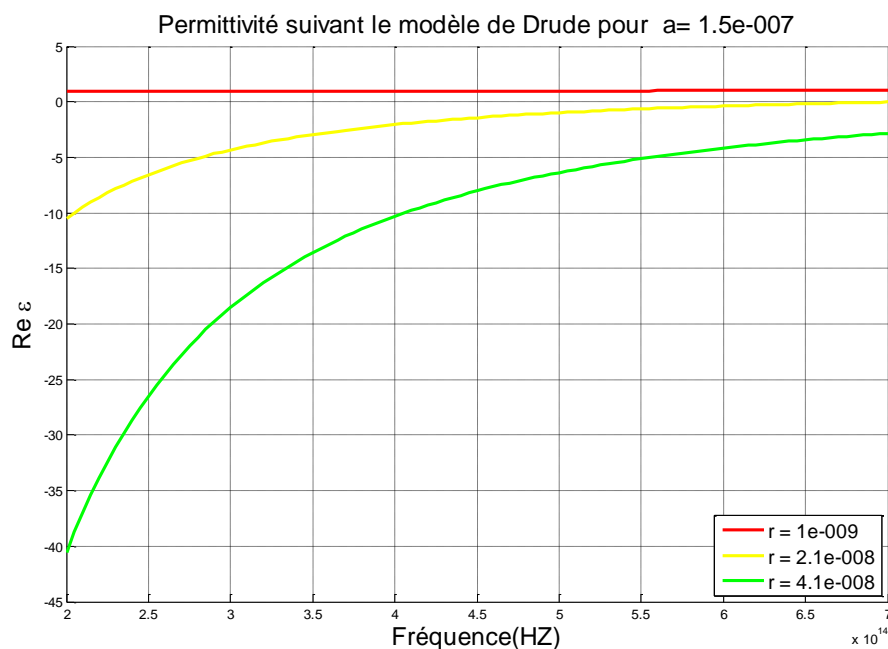


Figure 3-2 : Evolution de la partie réelle de la permittivité suivant le modèle de Drude pour a=150nm en fonction de la fréquence.

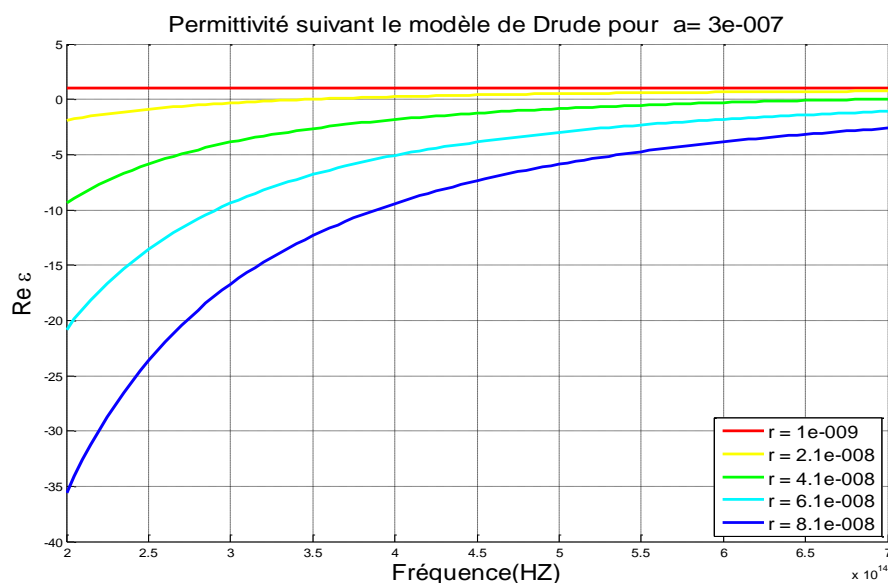


Figure 3-3 : Evolution de la partie réelle de la permittivité suivant le modèle de Drude pour a=300nm en fonction de la fréquence.

a	MAX ε	MIN ε
4,50E-07	-1,96E-03	-2,98684947
r(nm)	ω (HZ)	ε
2,10E-08	2E+14	-0,28038866
4,10E-08	3,1E+14	-1,03892004
6,10E-08	4,65E+14	-1,0307714
8,10E-08	6,2E+14	-1,0267238

a	MAX ε	MIN ε
6,00E-07	-0,01177136	-2,93444685
r(nm)	ω (HZ)	ε
4,10E-08	2,30E+14	-1,01E+00
6,10E-08	3,45E+14	-1,01E+00
8,10E-08	4,6E+14	-1,01E+00

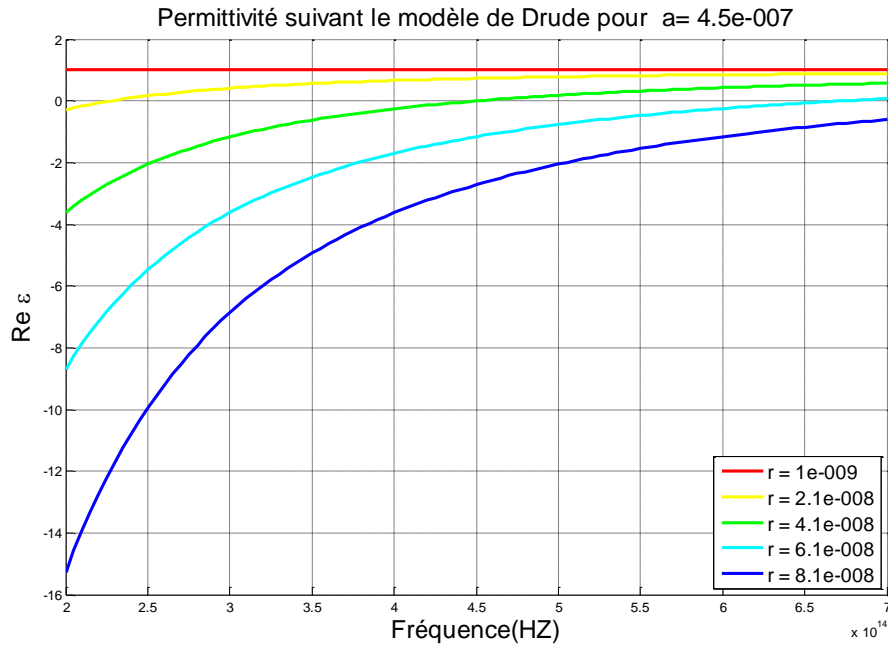


Figure 3-4 : Evolution de la partie réelle de la permittivité suivant le modèle de Drude pour a=450nm en fonction de la fréquence.

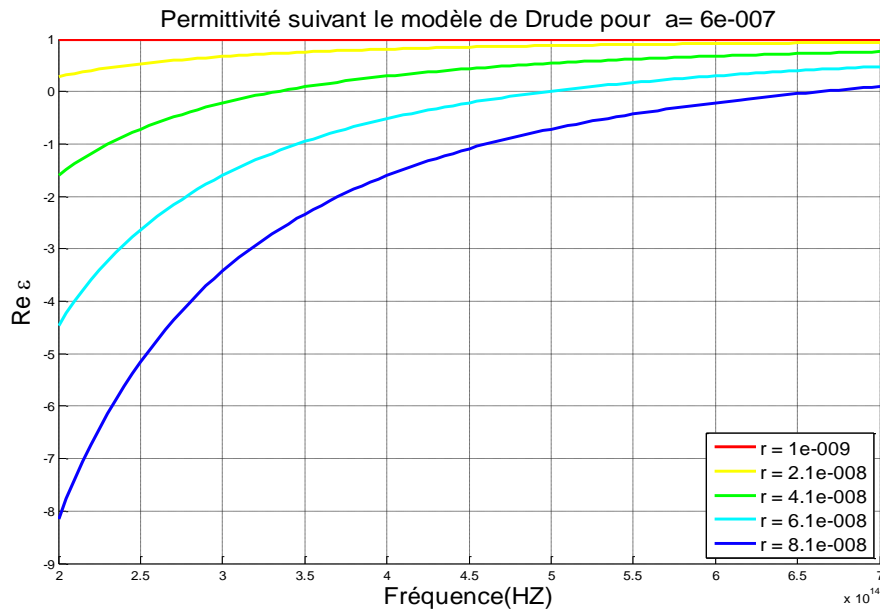


Figure 3-5 : Evolution de la partie réelle de la permittivité suivant le modèle de Drude pour a=600nm en fonction de la fréquence.

a	MAX ε	MIN ε
7,50E-07	0,99990548	-6,67E-01
r(nm)	ω (HZ)	ε
4,10E-08	4,00E+14	0,54792343
6,10E-08	4,05E+14	0,05021745
8,10E-08	4,00E+14	-0,6671201

a	MAX ε	MIN ε
1,00E-06	1,00E+00	0,06224494
r(nm)	ω (HZ)	ε
4,10E-08	4E+14	0,74570693
6,10E-08	4E+14	0,4530748
8,10E-08	4E+14	0,06224494

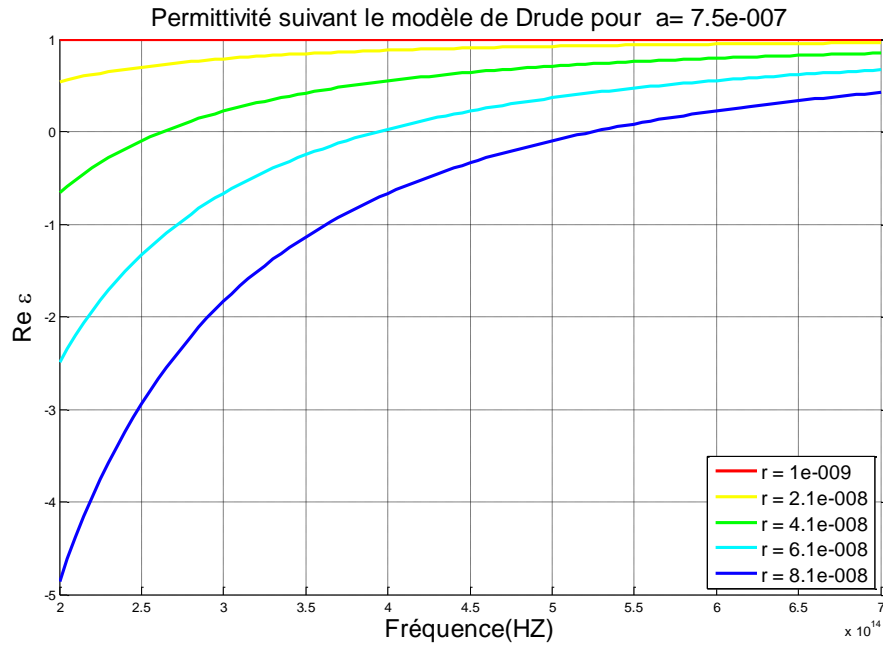


Figure 3-6 : Evolution de la partie réelle de la permittivité suivant le modèle de Drude pour a=750nm en fonction de la fréquence.

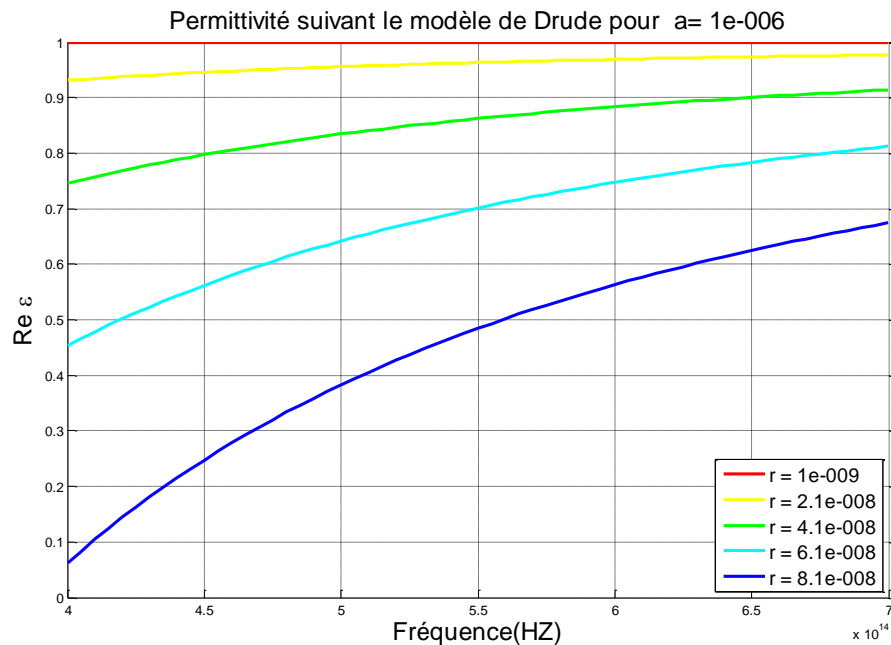


Figure 3-7 : Evolution de la partie réelle de la permittivité suivant le modèle de Drude pour a=1000nm en fonction de la fréquence.

3-3-2 permittivité suivant Maslovski (Annexe2)

a	MAX ε	MIN ε
1,50E-07	0,90396745	-4,83921663
r(nm)	ω (HZ)	ε
1,00E-09	4E+14	0,80993452
2,10E-08	6,35E+14	-1,0114952
4,10E-08	7E+14	-4,2131884

a	MAX ε	MIN ε
3,00E-07	0,97716399	-2,93931461
r(nm)	ω (HZ)	ε
4,10E-08	4E+14	-0,26435761
6,10E-08	4,1E+14	-1,08102504
8,10E-08	5,55E+14	-1,07647242

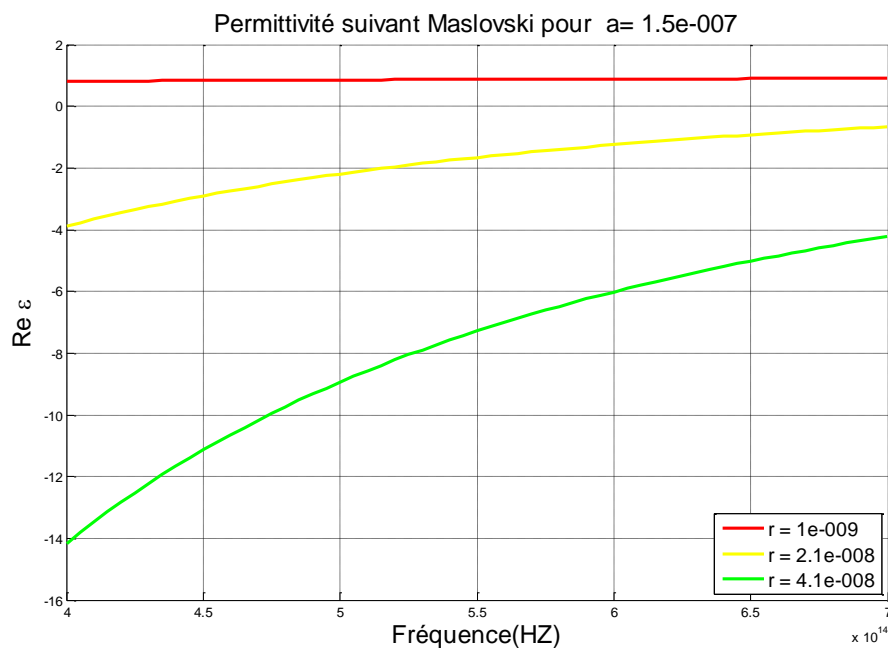


Figure 3-8 : Evolution de la partie réelle de la permittivité suivant Maslovski pour a=150nm en fonction de la fréquence.

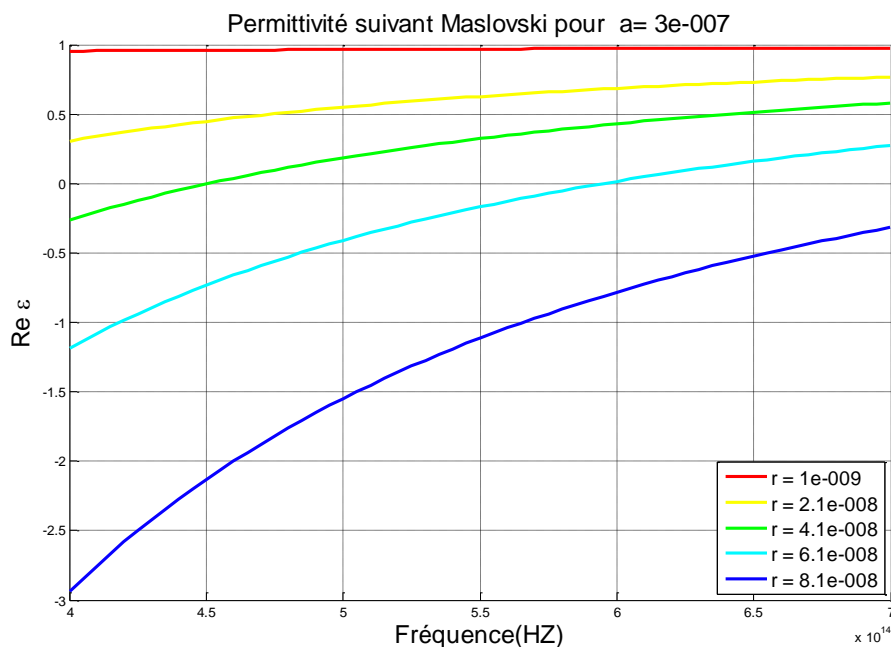


Figure 3-9 : Evolution de la partie réelle de la permittivité suivant Maslovski pour a=300nm en fonction de la fréquence.

a	MAX ε	MIN ε
3,50E-07	0,98340304	-1,05365409
r(nm)	ω (HZ)	ε
8,10E-08	4E+14	-1,05365409
6,10E-08	4E+14	-0,27198405

a	MAX ε	MIN ε
4,00E-07	0,98741035	-0,2349175
r(nm)	ω (HZ)	ε
8,10E-08	4E+14	-0,2349175

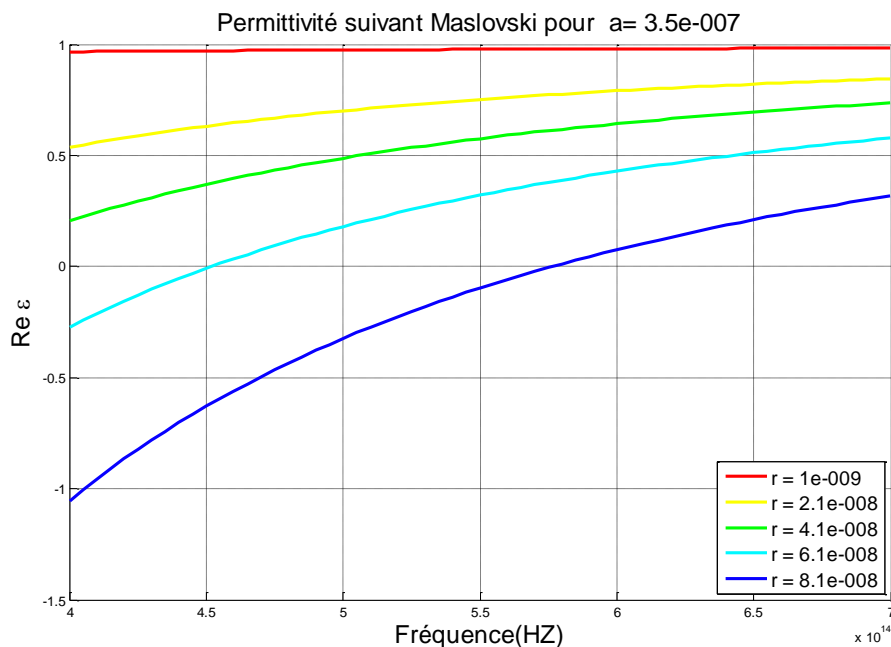


Figure 3-10 : Evolution de la partie réelle de la permittivité suivant Maslovski pour a=350nm en fonction de la fréquence.

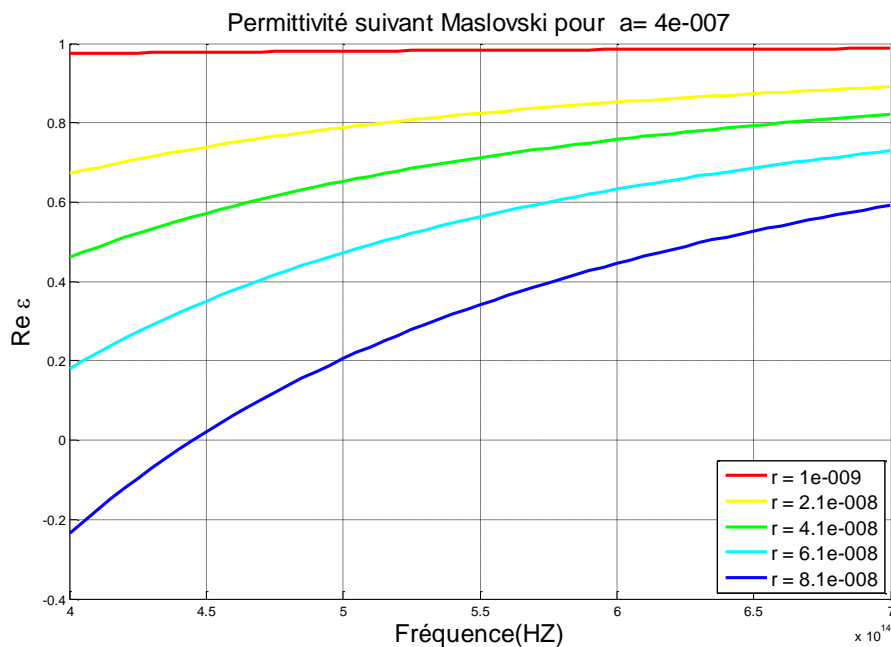


Figure 3-11 : Evolution de la partie réelle de la permittivité suivant Maslovski pour a=400nm en fonction de la fréquence.

a	MAX ε	MIN ε
4,50E-07	0,99013305	0,18680367
r(nm)	ω (HZ)	ε
8,10E-08	4E+14	0,18680367
6,10E-08	4E+14	0,4342237

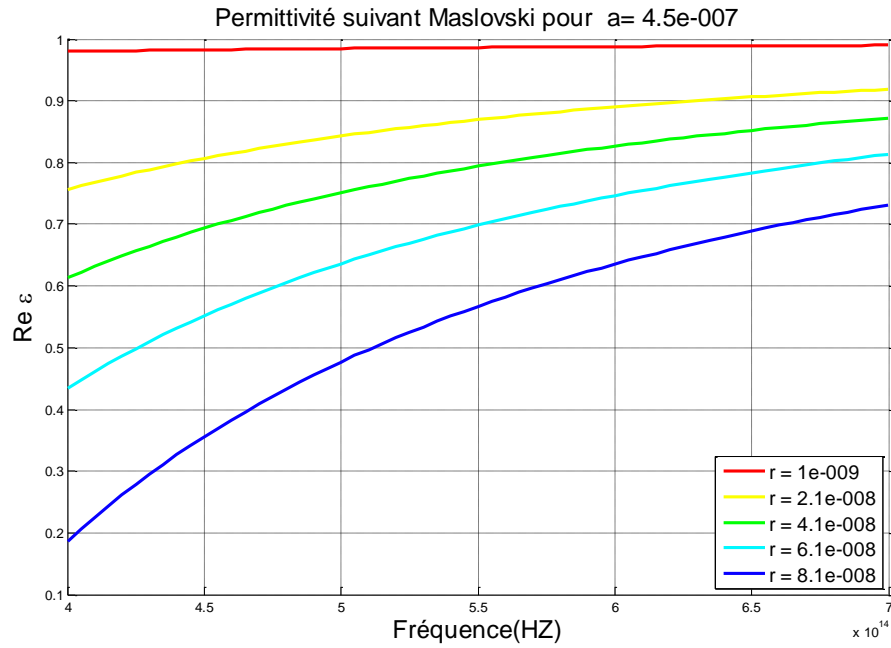


Figure 3-12 : Evolution de la partie réelle de la permittivité suivant Maslovski pour a=450nm en fonction de la fréquence.

3-3-3 Perméabilité suivant Lorentz

a	MAX μ	MIN μ
2,50E-08	1,97602379	-4,46759195
r(nm)	ω (HZ)	μ
1,00E-10	2,1E+14	-1,0729325

a	MAX μ	MIN μ
1,00E-07	1,98035949	-4,85424937
r(nm)	ω (HZ)	μ
1,00E-10	2,1E+14	-1,0821409
2,01E-08	5E+14	-4,68136607

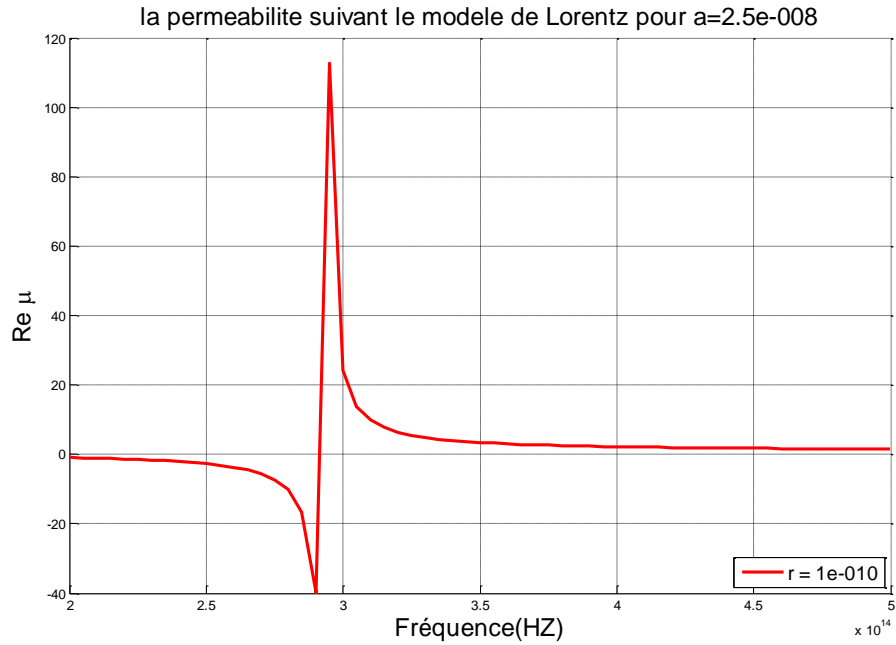


Figure 3-13 : Evolution de la partie réelle de la perméabilité suivant Lorentz pour a=25nm en fonction de la fréquence.

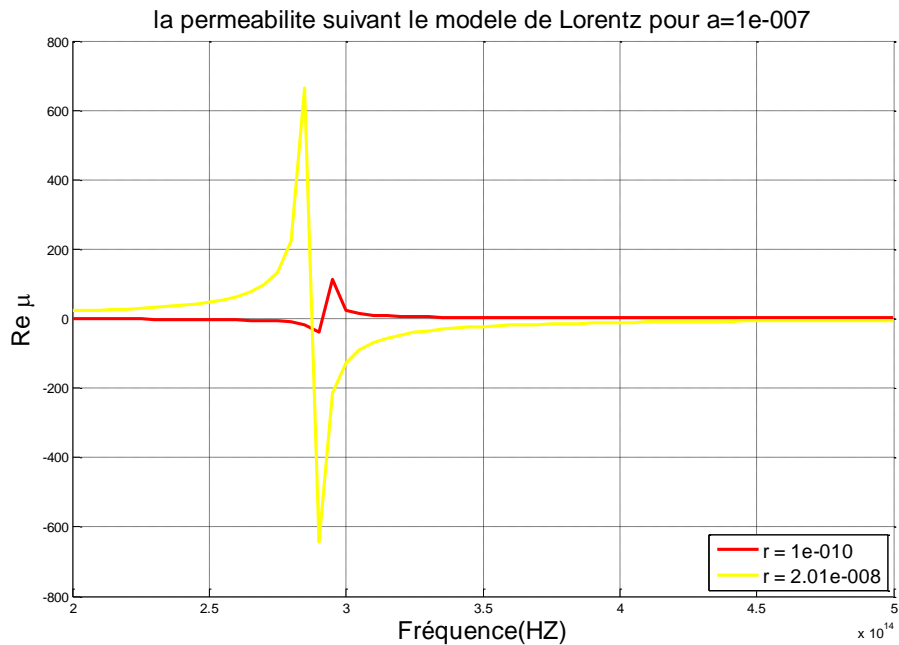


Figure 3-14 : Evolution de la partie réelle de la perméabilité suivant Lorentz pour a=100nm en fonction de la fréquence.

a	MAX μ	MIN μ
2,00E-07	1,98057627	-4,78047461
r(nm)	ω (HZ)	μ
1,00E-10	2,1E+14	-1,08260132
2,01E-08	4,1E+14	-1,00838654
4,01E-08	5E+14	-4,44874246

a	MAX μ	MIN μ
3,00E-07	1,98061642	-4,73126928
r(nm)	ω (HZ)	μ
1,00E-10	2,05E+14	-0,98445575
2,01E-08	3,1E+14	-1,07197411
4,01E-08	5E+14	-1,14264546
6,01E-08	5E+14	-4,25130636

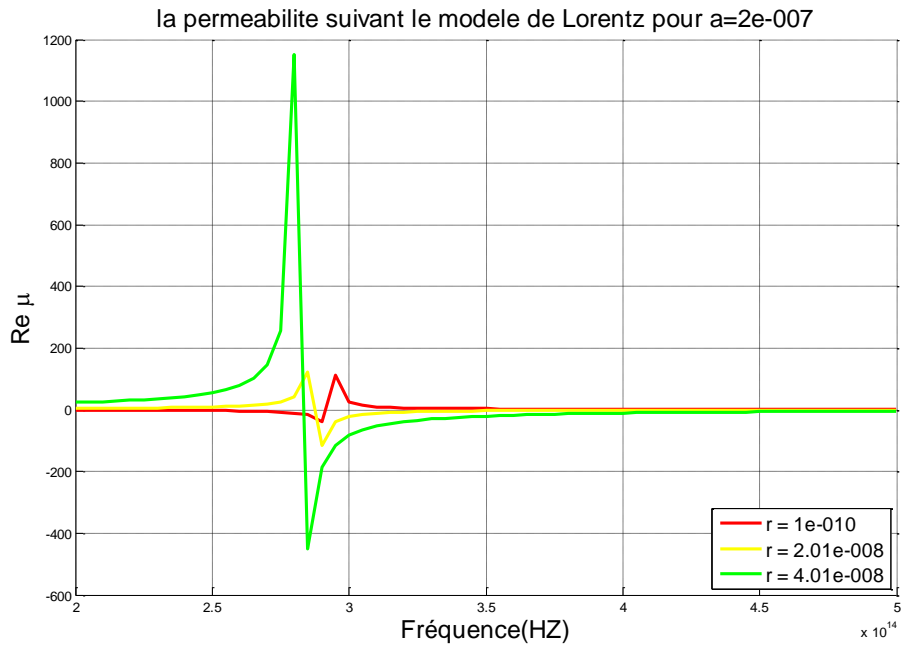


Figure 3-15 : Evolution de la partie réelle de la perméabilité suivant Lorentz pour a=200nm en fonction de la fréquence.

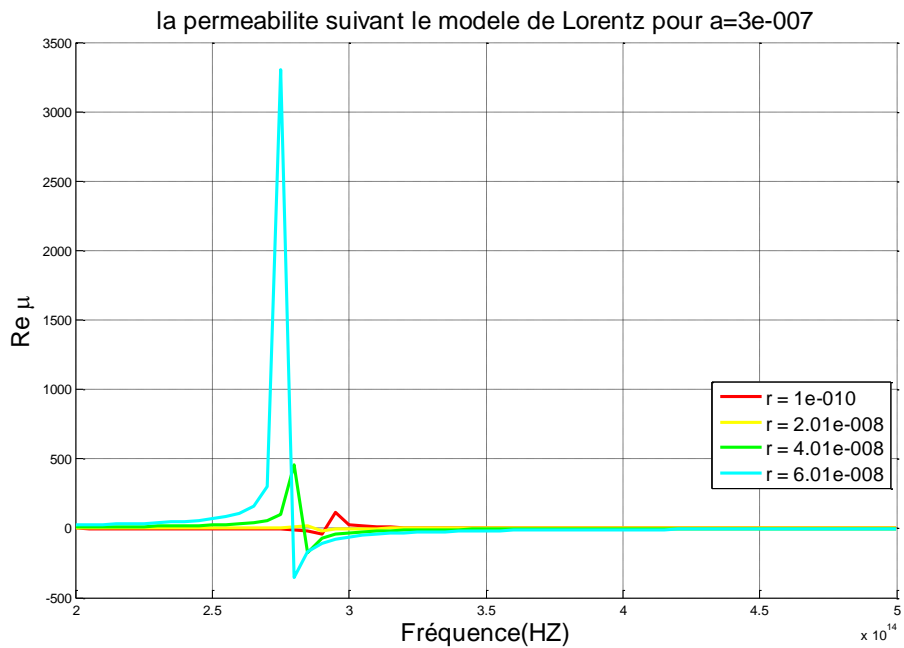


Figure 3-16 : Evolution de la partie réelle de la perméabilité suivant Lorentz pour a=300nm en fonction de la fréquence.

a	a	MAX μ
5,00E-07	1,98063697	-4,81656655
r(nm)	ω (HZ)	μ
2,01E-08	2,45E+14	-0,98837268
1,00E-10	2,1E+14	-1,08273023
4,01E-08	3,4E+14	-1,08573944
6,01E-08	4,6E+14	-1,02044261
8,01E-08	5E+14	-2,0771064

	a	MAX μ
	9,00E-07	1,98064497
	r(nm)	ω (HZ)
	1,00E-10	2,1E+14
	2,01E-08	2,15E+14
	4,01E-08	2,5E+14
	6,01E-08	2,95E+14
	8,01E-08	3,55E+14

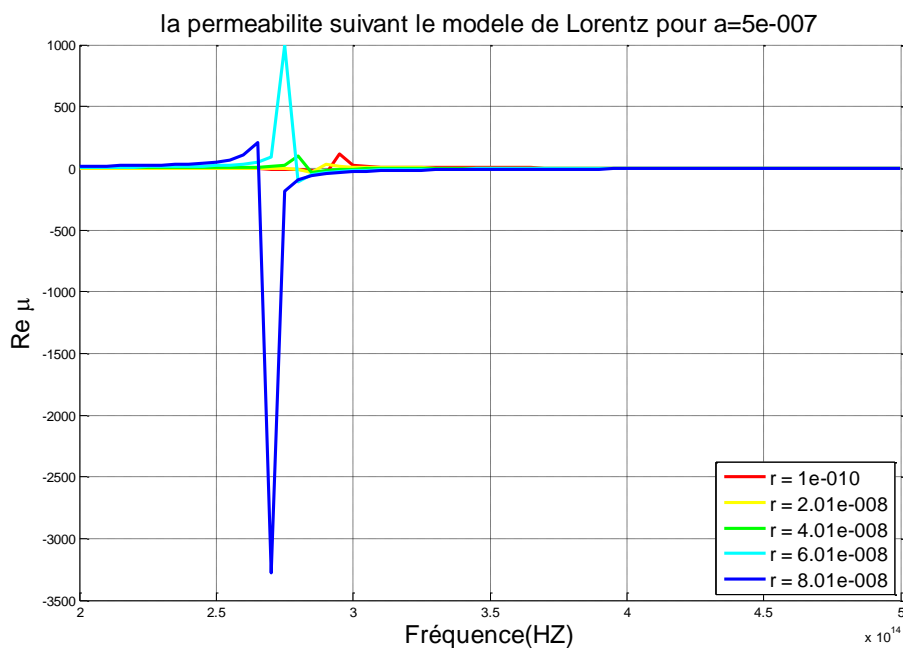


Figure 3-17 : Evolution de la partie réelle de la perméabilité suivant Lorentz pour a=500nm en fonction de la fréquence.

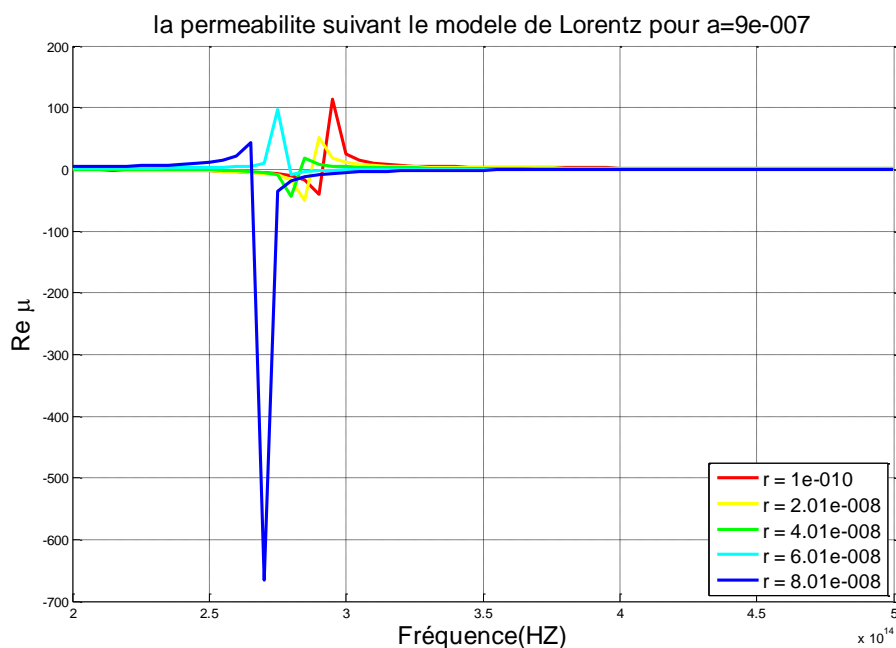


Figure 3-18 : Evolution de la partie réelle de la perméabilité suivant Lorentz pour a=900nm en fonction de la fréquence.

3-4 Etude paramétrique d'un SRR (Annexe3)

r(nm)	MAX μ	MIN μ	r(nm)	MAX μ	MIN μ
3,00E-08	1,96740731	-4,62423633	4,00E-08	1,926199	-4,030908
d(nm)	ω (HZ)	μ	d(nm)	ω (HZ)	μ
5,00E-10	5,90E+14	-1,01564722	1,00E-10	2,1E+14	-1,08274721
1,50E-09	8,9E+14	-1,00397306	2,01E-08	2,15E+14	-1,00592201
2,50E-09	1,11E+15	-1,00653369	4,01E-08	2,5E+14	-1,08589655
3,50E-09	1,20E+15	-0,77606076	6,01E-08	2,95E+14	-1,33272378
4,50E-09	1,20E+15	-0,53422106	8,01E-08	3,55E+14	-1,04485188

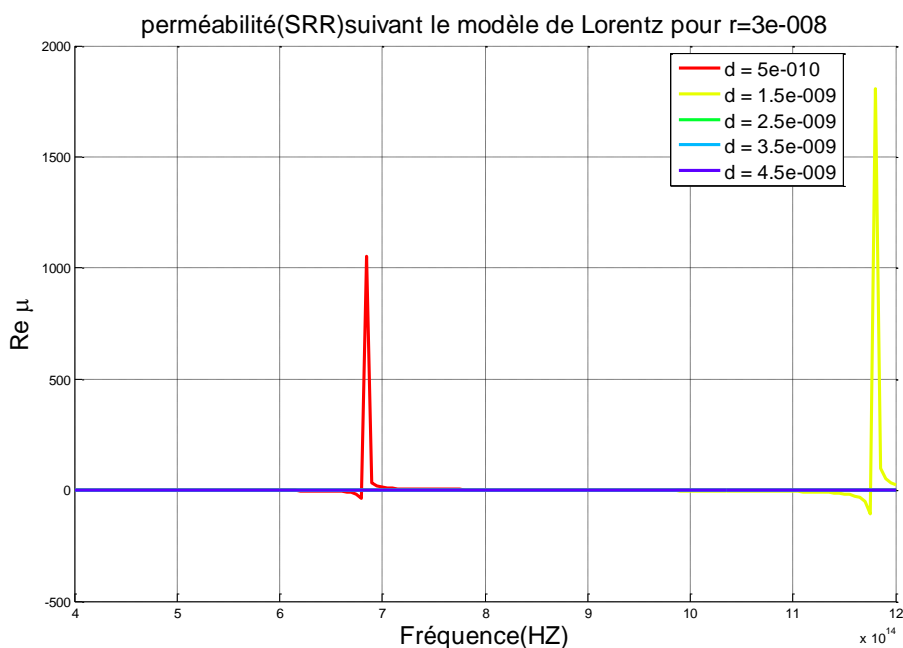


Figure 3-19 : Evolution de la partie réelle de la perméabilité d'un SRR pour r=30nm en fonction de la fréquence.

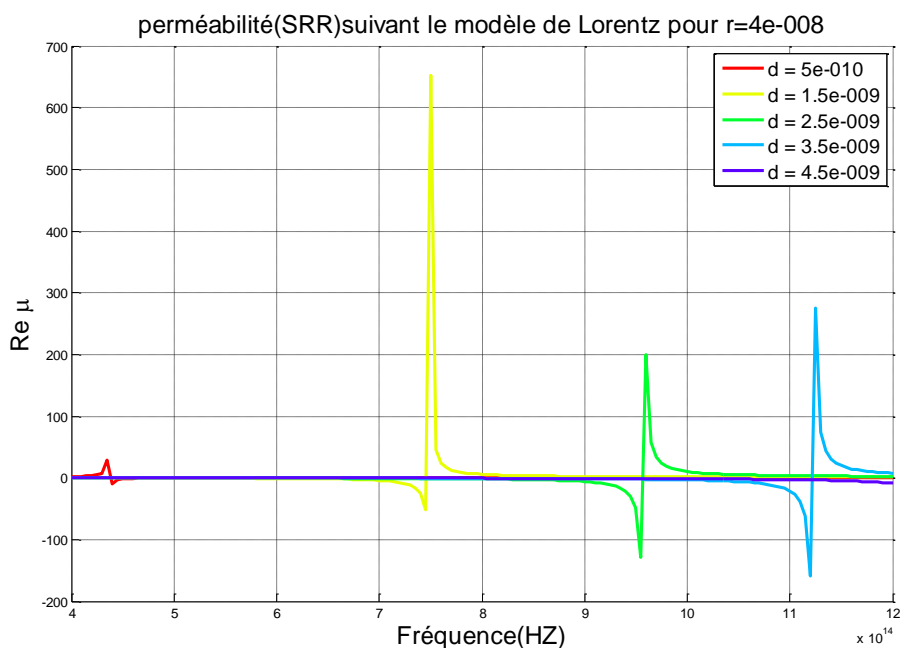


Figure 3-20 : Evolution de la partie réelle de la perméabilité d'un SRR pour r=40nm en fonction de la fréquence.

r(nm)	MAX μ	MIN μ
5,00E-08	1,99044552	-4,65988662
d(nm)	ω (HZ)	μ
5,00E-10	4E+14	-0,98174765
1,50E-09	4,95E+14	-1,41032465
3,50E-09	6,2E+14	-1,02340658
4,50E-09	6,7E+14	-1,01247009
2,50E-09	5,6E+14	-1,01170099

r(nm)	MAX μ	MIN μ
6,00E-08	1,98566391	-4,63140713
d(nm)	ω (HZ)	μ
1,50E-09	4,2E+14	-1,06443236
2,50E-09	4,6E+14	-0,9020865
3,50E-09	5E+14	-1,10705311
4,50E-09	5,3E+14	-1,06980269
5,00E-10	4E+14	-0,59780148

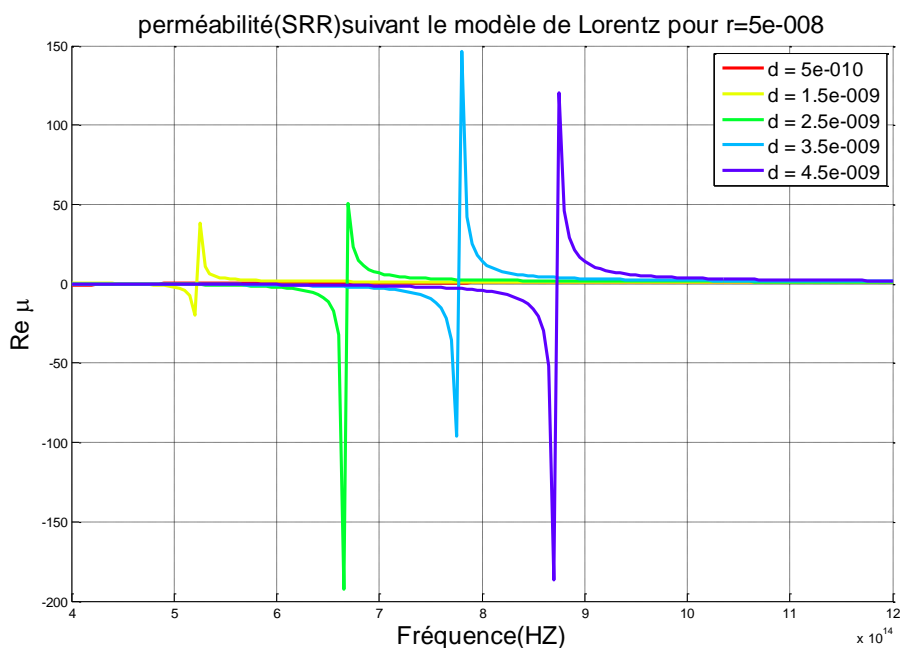


Figure 3-21 : Evolution de la partie réelle de la perméabilité d'un SRR pour r=50nm en fonction de la fréquence.

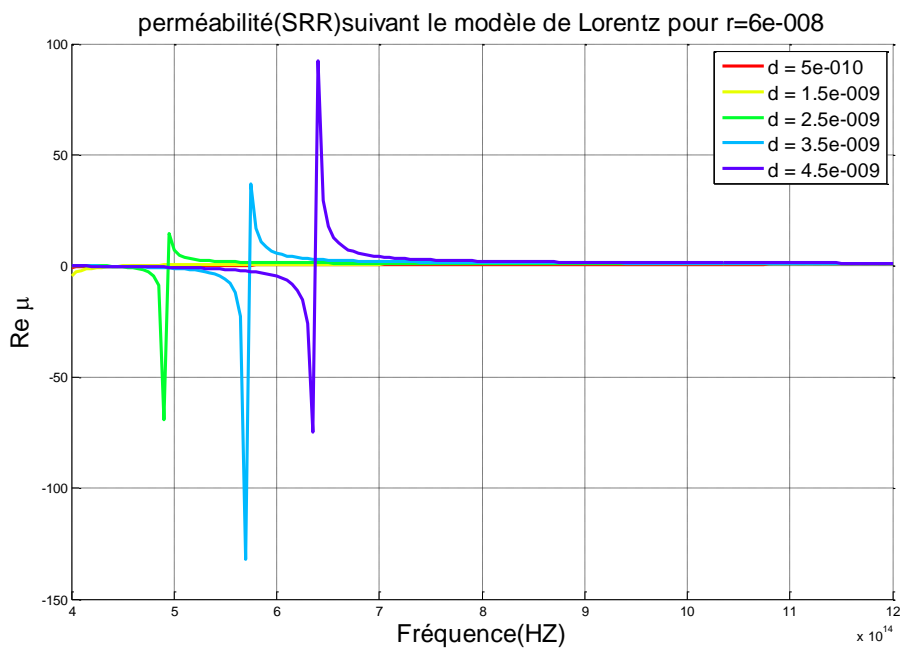


Figure 3-22 : Evolution de la partie réelle de la perméabilité d'un SRR pour r=60nm en fonction de la fréquence.

r(nm)	MAX μ	MIN μ
7,00E-08	1,96065472	-3,43021653
d(nm)	ω (HZ)	μ
5,00E-10	4E+14	-0,49862233
1,50E-09	4,05E+14	-0,53072025
2,50E-09	4,05E+14	-0,94443568
3,50E-09	4,25E+14	-1,33921299
4,50E-09	4,4E+14	-1,01287501

r(nm)	MAX μ	MIN μ
8,00E-08	1,97085499	-4,70436335
d(nm)	ω (HZ)	μ
5,00E-10	3,45E+14	-1,03633898
1,50E-09	3,55E+14	-1,08012546
2,50E-09	3,65E+14	-1,12188731
3,50E-09	3,75E+14	-1,15117392
4,50E-09	3,85E+14	-0,98041947

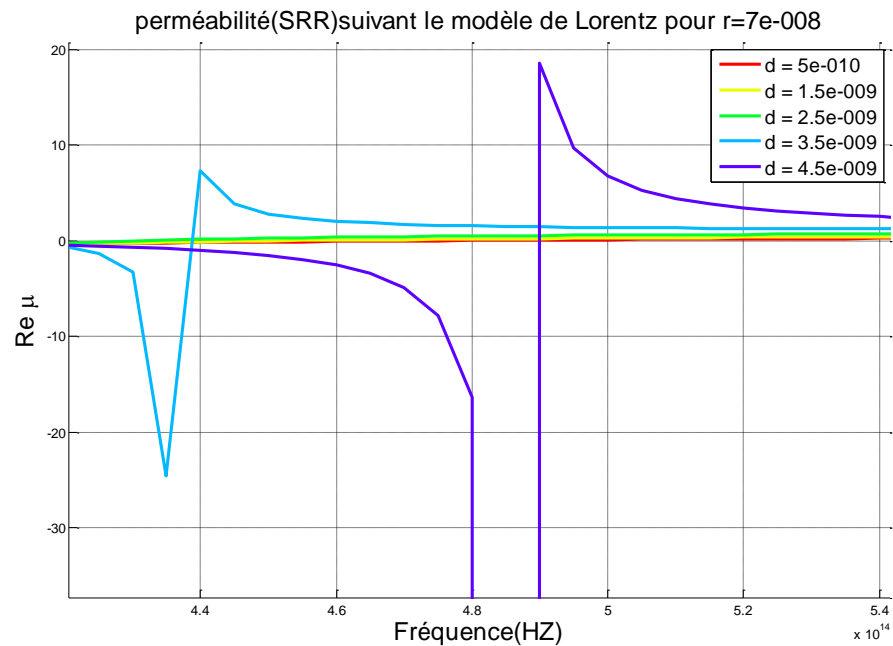


Figure 3-23 : Evolution de la partie réelle de la perméabilité d'un SRR pour r=70nm en fonction de la fréquence.

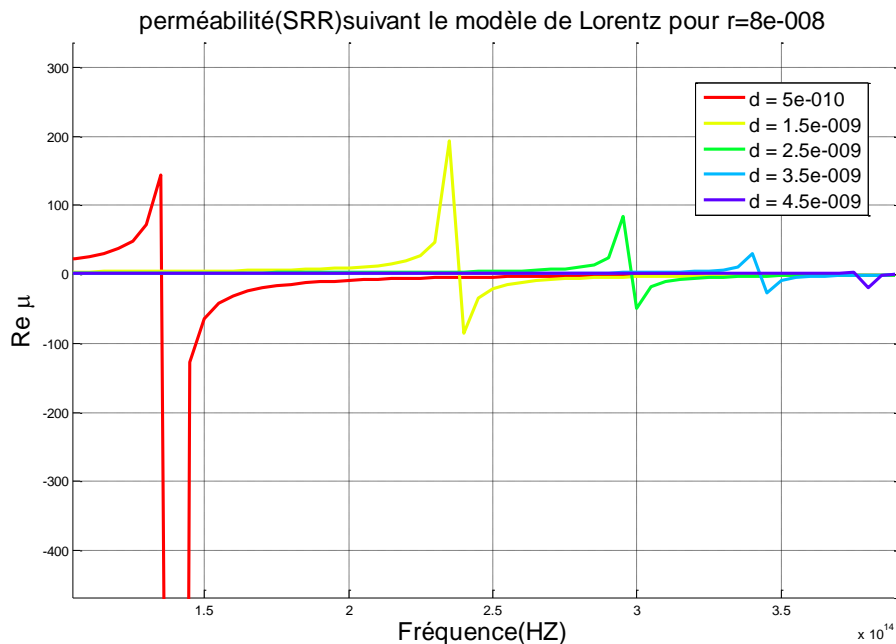


Figure 3-24 : Evolution de la partie réelle de la perméabilité d'un SRR pour r=80nm en fonction de la fréquence.

r(nm)	MAX μ	MIN μ
9,00E-08	1,97754524	-4,76321979
d(nm)	ω (HZ)	μ
5,00E-10	3,4E+14	-1,03017069
1,50E-09	3,4E+14	-1,07167531
2,50E-09	3,45E+14	-1,02115803
3,50E-09	3,45E+14	-1,07676092
4,50E-09	3,5E+14	-0,94662737

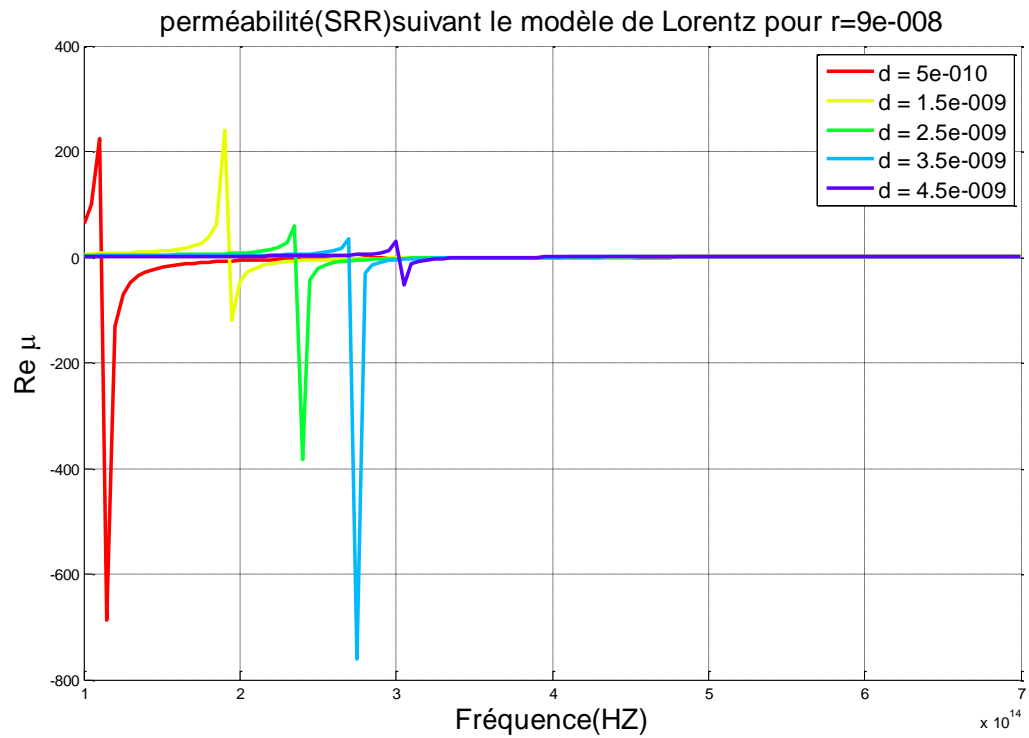


Figure 3-25 : Evolution de la partie réelle de la perméabilité d'un SRR pour r=90nm en fonction de la fréquence.

Conclusion

On a simulé un arrangement des fils métalliques avec une étude paramétrique qui consiste à faire varier le rayon des tiges en fonction du pas a , puis en fait varier le pas a en fonction des différents valeurs de r .

On a conçu un programme numérique suivant le modèle de Drude, et un autre suivant Maslovski et on a fait plusieurs simulations comme l'ont montré nos calculs, d'après les résultats obtenus, on remarque la présence d'une permittivité négative suivant les deux modèles et des valeurs qui convergent vers -1 qui nous intéresse pour notre application (lentille parfaite). Le modèle de Drude nous permet un intervalle des paramètres du motif plus que le modèle de Maslovski c'est-à-dire plus de chance de solution pour la fabrication .

L'allure de toutes les figures selon Drude ou Maslovski ainsi que pour Lorentz sont les mêmes que présentés dans la théorie (Figure 1-5). On remarque bien qu'à partir de la figure 3-3 pour une période de 300 nm on commence à repérer les valeurs de permittivité qui convergent vers -1 jusqu'à la figure 3-5 avec un pas de 600 nm.

La Figure 3-19 montre l'évolution de la partie réelle de la perméabilité d'un SRR pour $r=30\text{nm}$ en fonction de la fréquence en variant la distance d on remarque une montée de fréquences pour la réfraction négative. Tandis que pour la valeur de $r=90\text{nm}$ on observe une réfraction négative pour de basses fréquences qui est illustré par la figure 3-25.

Pour certaines combinaisons de ces paramètres présentent une permittivité négative, tandis que un arrangement des résonateurs en anneau permet une perméabilité négative.

On a remarqué la réduction des dimensions des motifs à une montée en fréquence pour la simulation de la réfraction négative qui cause pas mal de problèmes en termes de fabrication et le comportement des métaux aux grandes fréquences.

Enfin un milieu doublement négatif peut donc être obtenu en combinant des résonateurs à anneau fendus (perméabilité négative) et des tiges métalliques (permittivité négative).

Chapitre 4 :

L'approche diélectrique

4-1 Introduction

Pour les matériaux diélectriques comme les cristaux photoniques on utilise les digrammes de bande pour la détermination de l'ensemble de points de fonctionnement possible dans la zone de brouillon, en cherchant les bandes interdites TE et TM possible ainsi que les bandes interdites communes pour un paramétrage suivant le rapport rayon /pas ou bien en variant le facteur de remplissage, et voir où se situe la bande interdite la plus élevée.

4-2 Définition des paramètres d'entrée

Notre programme utilise une structure périodique triangulaire bidimensionnelle de trous d'air dans un diélectrique d'indice de réfraction $n=3.26$.

-Indiquer le nombre de bandes (10 bandes)

-Il faut ensuite fixer la liste des point k (vecteurs d'onde de Bloch) que l'on souhaite calculer sur les différentes bandes. Ceci est défini par la variable k -points qui est une liste de vecteurs à trois dimensions: ce sont les vecteurs qui décrivent le contour de la zone de Brillouin Γ, X, M (définie au chapitre 2).

-Définir le nombre de points k sur chaque vecteur de la zone de Brillouin pour réaliser la simulation($k=40$)

-Définir la géométrie du système (rapport rayon/période ou facteur de remplissage ici en fait varier f de 20% à 90%)

4-3 Définition des paramètres de sortie :

Maintenant que les variables d'entrées sont fixées :

-On calcule la structure de bande pour les deux modes TE et TM .

-Les fréquences ω_i ; ω_{i+1} ; $\omega_{i+1} - \omega_i$ pour le mode TM.

-Les fréquences ω_i ; ω_{i+1} ; $\omega_{i+1} - \omega_i$ pour le mode TE.

-Les fréquences ω_j ; ω_{j+1} ; $\omega_{j+1} - \omega_j$ pour la bande interdite commune .

-On calcule la pente de $\omega(k)$ pour la direction Γ, X, M .

-On trace la courbe de l'indice de réfraction en fonction de la fréquence.

4-4 résultats de simulation

4-4-1 Diagramme de bande pour f=20%

Bande TM

ω_i	ω_{i+1}	$\omega_{i+1} - \omega_i$
0,198117429	0,23811909	0,04000166
0,363453874	0,26982385	-0,09363003
0,390256743	0,37891235	-0,01134439
0,433714918	0,39273776	-0,04097716
0,499795185	0,48771645	-0,01207873
0,53305809	0,48815727	-0,04490082
0,560991393	0,56782774	0,00683634
0,658995314	0,59528288	-0,06371244
0,671677842	0,61597041	-0,05570743

Bande TE

ω_i	ω_{i+1}	$\omega_{i+1} - \omega_i$
0,19005326	0,2046106	0,01455734
0,35489745	0,26417066	-0,09072679
0,35927309	0,35291911	-0,00635398
0,42155745	0,39368854	-0,0278689
0,48718629	0,39370643	-0,09347985
0,50035373	0,501395	0,00104127
0,54623424	0,51566927	-0,03056497
0,62852274	0,56509089	-0,06343186
0,63887368	0,60573807	-0,03313561

bande commune

ω_j	ω_{j+1}	$\omega_{j+1} - \omega_j$
0,198117429	0,2046106	0,00649317

$\omega_{i+1} - \omega_i$ positive correspond à l'existence d'une bande interdite

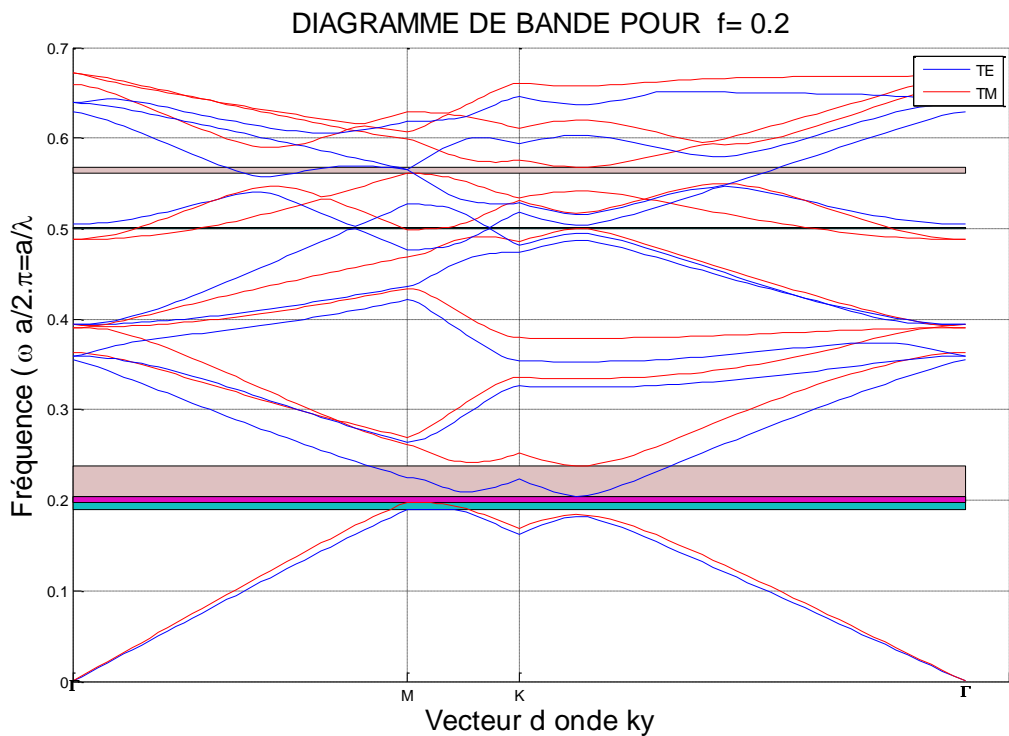


Figure 4-1 :Diagramme de bande d'un cristal photonique ,réseau triangulaire de trous d'air dans une matrice diélectrique (n=3.26) pour un facteur de remplissage de 20%

4-4-2 Diagramme de bande pour f=30%

Bande TM

ω_i	ω_{i+1}	$\omega_{i+1} - \omega_i$
0,20775094	0,27568786	0,06793692
0,38092255	0,30430853	-0,07661402
0,42776731	0,41706241	-0,0107049
0,46930046	0,43041718	-0,03888328
0,5263543	0,53017808	0,00382377
0,57762575	0,54859729	-0,02902846
0,60197394	0,63258688	0,03061294
0,67677778	0,65350592	-0,02327187
0,70799397	0,6836386	-0,02435537

Bande TE

ω_i	ω_{i+1}	$\omega_{i+1} - \omega_i$
0,19683503	0,21767634	0,02084131
0,35713269	0,29063646	-0,06649623
0,36824642	0,36825074	4,32E-06
0,44328622	0,43228651	-0,01099971
0,50674415	0,43265593	-0,07408822
0,52327068	0,52400068	0,00073001
0,58640756	0,53704103	-0,04936653
0,66147917	0,58830341	-0,07317575
0,66284445	0,65292986	-0,00991459

bande commune

ω_j	ω_{j+1}	$\omega_{j+1} - \omega_j$
0,20775094	0,21767634	0,00992539

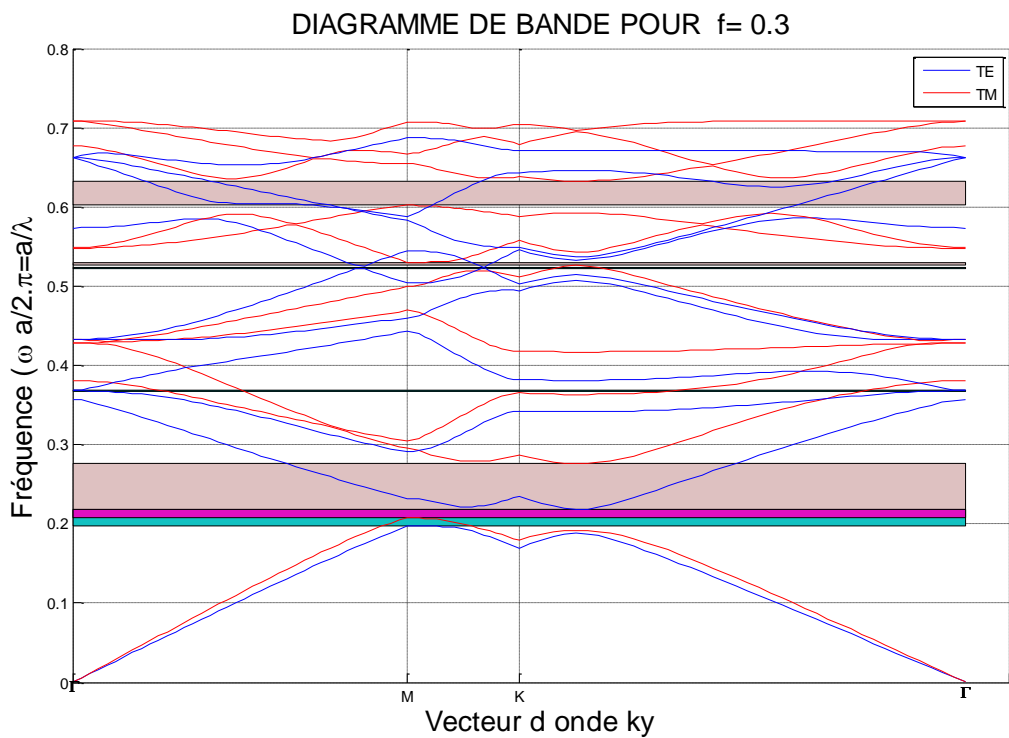


Figure 4-2 :Diagramme de bande d'un cristal photonique ,réseau triangulaire de trous d'air dans une matrice diélectrique (n=3.26) pour un facteur de remplissage de 30%

4-4-3 Diagramme de bande pour f=40%

Bande TM

ω_i	ω_{i+1}	$\omega_{i+1} - \omega_i$
0,21953843	0,31967644	0,10013801
0,41132605	0,3473177	-0,06400835
0,48047349	0,46515343	-0,01532006
0,521501	0,48191572	-0,03958529
0,56982133	0,56777369	-0,00204764
0,62720088	0,60148611	-0,02571477
0,64962992	0,67431405	0,02468413
0,72307409	0,71177061	-0,01130347
0,74566779	0,74605361	0,00038583

Bande TE

ω_i	ω_{i+1}	$\omega_{i+1} - \omega_i$
0,2061887	0,23168571	0,02549701
0,36208858	0,31956644	-0,04252215
0,38293178	0,38294778	1,60E-05
0,46720461	0,47711209	0,00990748
0,52205254	0,48344748	-0,03860506
0,55725292	0,55764272	0,00038981
0,62356706	0,58734395	-0,03622312
0,69735827	0,62702892	-0,07032935
0,69740339	0,69800181	0,00059842

bande commune

ω_j	ω_{j+1}	$\omega_{j+1} - \omega_j$
0,21953843	0,23168571	0,01214728

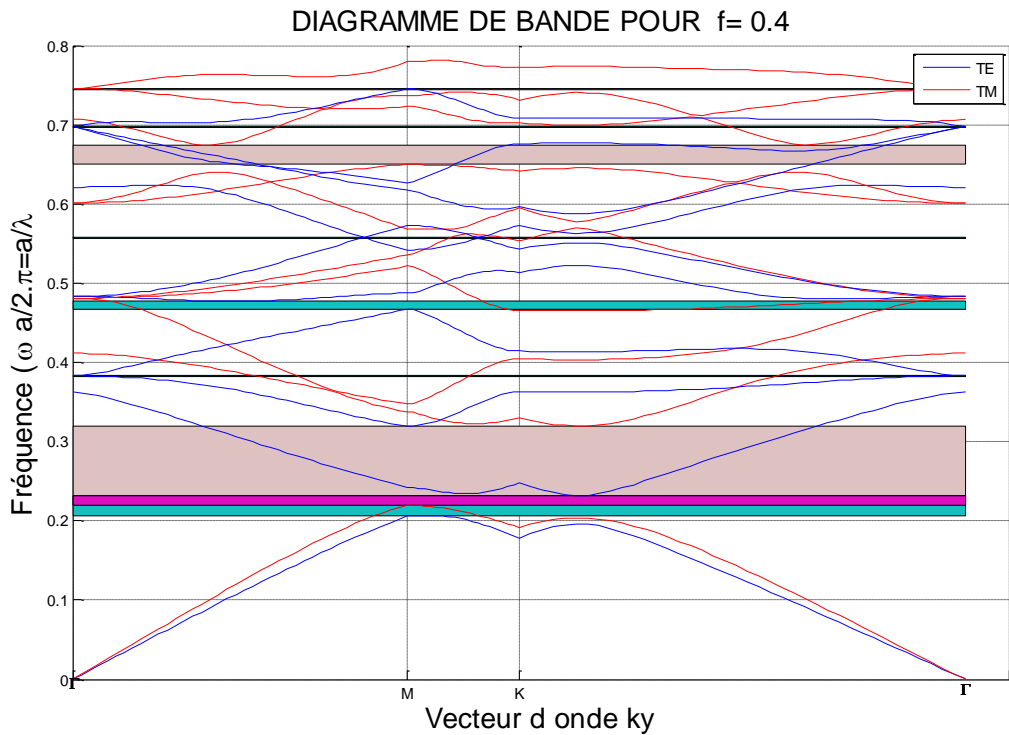


Figure 4- 3 : Diagramme de bande d'un cristal photonique ,réseau triangulaire de trous d'air dans une matrice diélectrique (n=3.26) pour un facteur de remplissage de 40%

4-4-4 Diagramme de bande pour f=50%

Bande TM

ω_i	ω_{i+1}	$\omega_{i+1} - \omega_i$
0,23514243	0,37039867	0,13525624
0,45842944	0,40042937	-0,05800007
0,54748018	0,52611842	-0,02136176
0,58543138	0,55501632	-0,03041506
0,62679985	0,62727025	0,0004704
0,68500171	0,64617844	-0,03882326
0,71053969	0,71413756	0,00359786
0,79387991	0,76787654	-0,02600336
0,80250036	0,78921824	-0,01328212

Bande TE

ω_i	ω_{i+1}	$\omega_{i+1} - \omega_i$
0,2188532	0,2479892	0,029136
0,37110089	0,35183176	-0,01926913
0,40519188	0,40521	1,81E-05
0,4933313	0,51745749	0,02412619
0,54566399	0,54575134	8,74E-05
0,60393327	0,60453561	0,00060234
0,65535035	0,66077285	0,0054225
0,74059763	0,68611382	-0,05448382
0,74084235	0,74879605	0,0079537

bande commune

ω_j	ω_{j+1}	$\omega_{j+1} - \omega_j$
0,23514243	0,2479892	0,01284678

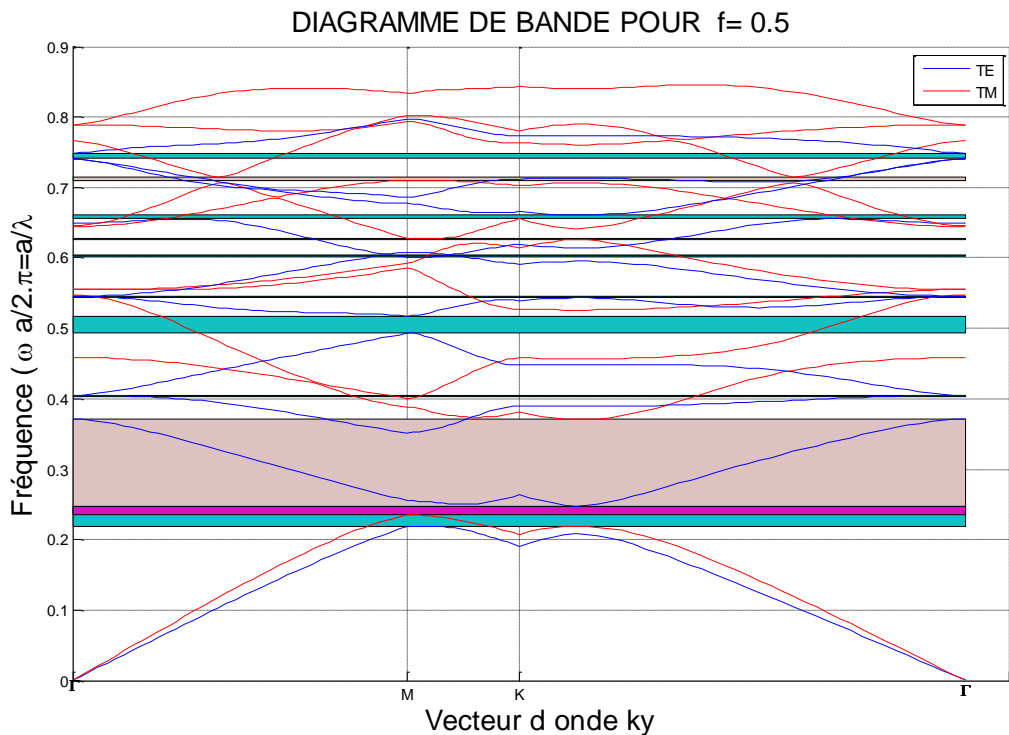


Figure 4-4 : Diagramme de bande d'un cristal photonique ,réseau triangulaire de trous d'air dans une matrice diélectrique (n=3.26) pour un facteur de remplissage de 50%

4-4-5 Diagramme de bande pour f=60%

Bande TM

ω_i	ω_{i+1}	$\omega_{i+1} - \omega_i$
0,25695447	0,42541073	0,16845625
0,52981178	0,46296661	-0,06684517
0,62579397	0,59203592	-0,03375805
0,65863486	0,65278369	-0,00585117
0,69546916	0,68111994	-0,01434922
0,77029805	0,68232043	-0,08797762
0,79957569	0,80790484	0,00832915
0,87163373	0,84463963	-0,0269941
0,88049407	0,88449077	0,0039967

Bande TE

ω_i	ω_{i+1}	$\omega_{i+1} - \omega_i$
0,23627924	0,26858985	0,03231061
0,38612476	0,3904157	0,00429094
0,43907282	0,43910629	3,35E-05
0,52608312	0,55240673	0,02632361
0,61494004	0,61498256	4,25E-05
0,65226982	0,67535025	0,02308043
0,70731988	0,75201877	0,04469889
0,82218868	0,76058407	-0,06160462
0,82232536	0,8224498	0,00012444

bande commune

ω_j	ω_{j+1}	$\omega_{j+1} - \omega_j$
0,25695447	0,26858985	0,01163537

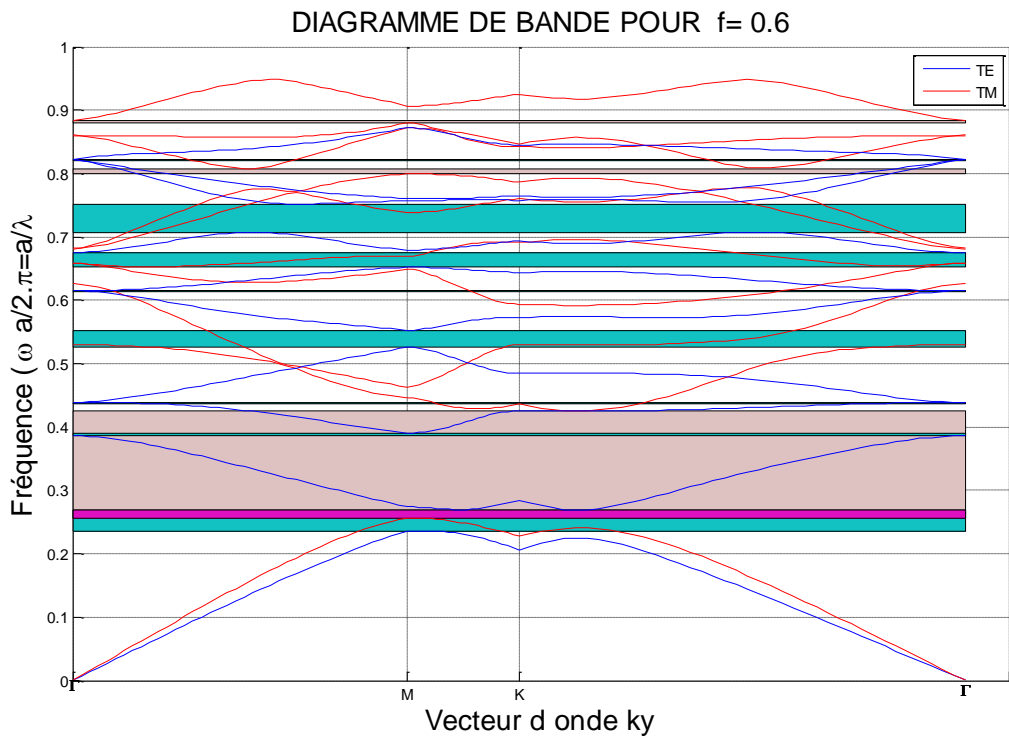


Figure 4-5 : Diagramme de bande d'un cristal photonique ,réseau triangulaire de trous d'air dans une matrice diélectrique (n=3.26) pour un facteur de remplissage de 60%

4-4-6 Diagramme de bande pour f=70%

Bande TM

ω_i	ω_{i+1}	$\omega_{i+1} - \omega_i$
0,2893879	0,47784713	0,18845923
0,63175911	0,52815666	-0,10360245
0,70928054	0,6446282	-0,06465234
0,72672641	0,72774982	0,00102341
0,78553496	0,78581375	0,00027879
0,91722457	0,78641205	-0,13081253
0,93765061	0,96004325	0,02239264
1,00374519	0,99217784	-0,01156735
1,01063169	1,02130359	0,0106719

Bande TE

ω_i	ω_{i+1}	$\omega_{i+1} - \omega_i$
0,26139103	0,29685395	0,03546292
0,4105717	0,44206429	0,03149258
0,49349907	0,49353091	3,18E-05
0,57515702	0,60223178	0,02707476
0,69048146	0,69048217	7,11E-07
0,7132128	0,71100015	-0,00221264
0,78737357	0,8101238	0,02275023
0,90398797	0,85120551	-0,05278246
0,92166007	0,89048467	-0,0311754

bande commune

ω_j	ω_{j+1}	$\omega_{j+1} - \omega_j$
0,2893879	0,29685395	0,00746605

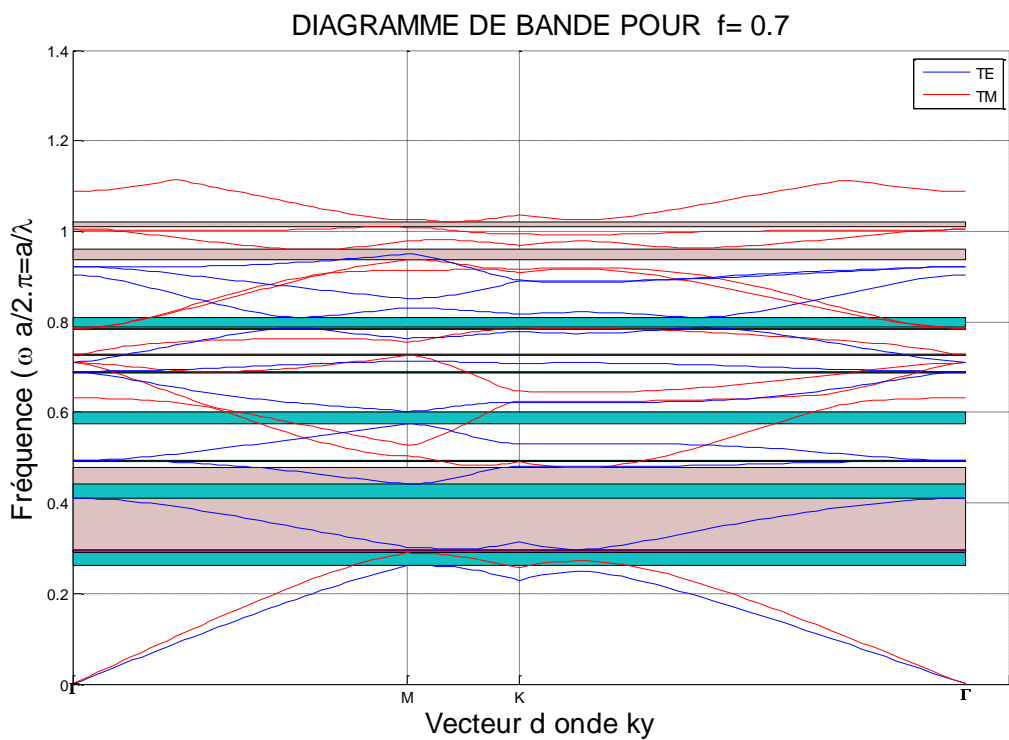


Figure 4-6 : Diagramme de bande d'un cristal photonique ,réseau triangulaire de trous d'air dans une matrice diélectrique (n=3.26) pour un facteur de remplissage de 70%

4-4-7 Diagramme de bande pour f=80%

Bande TM

ω_i	ω_{i+1}	$\omega_{i+1} - \omega_i$
0,3438449	0,51772128	0,17387638
0,757899	0,58379932	-0,17409968
0,75898312	0,75205138	-0,00693174
0,84172275	0,87470627	0,03298352
0,92066029	0,89167534	-0,02898496
1,08124498	0,89326148	-0,1879835
1,08920316	1,12401108	0,03480792
1,2374896	1,15770082	-0,07978877
1,25936115	1,20150557	-0,05785558

Bande TE

ω_i	ω_{i+1}	$\omega_{i+1} - \omega_i$
0,3005125	0,33937804	0,03886554
0,45142404	0,52044615	0,0690221
0,59386825	0,59404939	0,00018114
0,6634039	0,68983748	0,02643358
0,75953968	0,79417527	0,03463559
0,81434525	0,79455057	-0,01979468
0,87008918	0,89784098	0,0277518
0,96340747	0,97335066	0,00994319
1,07237067	1,06010025	-0,01227041

bande commune

ω_j	ω_{j+1}	$\omega_{j+1} - \omega_j$
0	0	

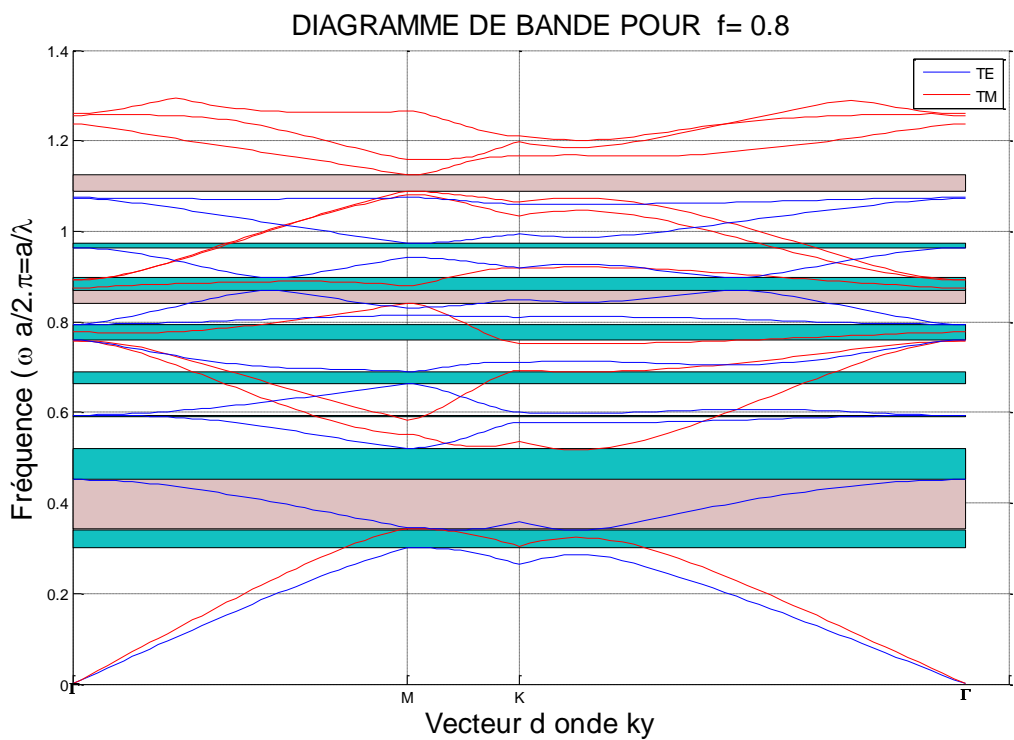


Figure 4-7 : Diagramme de bande d'un cristal photonique ,réseau triangulaire de trous d'air dans une matrice diélectrique (n=3.26) pour un facteur de remplissage de 80%

4-4-8 Diagramme de bande pour f=90%

Bande TM

ω_i	ω_{i+1}	$\omega_{i+1} - \omega_i$
0,46667796	0,54414114	0,07746318
0,91850876	0,63790883	-0,28059994
0,92012294	0,89372358	-0,02639936
1,02588122	0,96354395	-0,06233727
1,14316289	0,96429198	-0,17887091
1,22972496	1,06196437	-0,16776059
1,27020289	1,27581273	0,00560984
1,32908079	1,343645	0,01456421
1,49205218	1,40009285	-0,09195933

Bande TE

ω_i	ω_{i+1}	$\omega_{i+1} - \omega_i$
0,36960887	0,41122183	0,04161296
0,52570706	0,62965293	0,10394586
0,80462975	0,78643429	-0,01819546
0,8530724	0,82522253	-0,02784987
0,90524569	0,97936228	0,0741166
1,01591225	0,98246621	-0,03344604
1,03340463	1,10557476	0,07217013
1,23181346	1,20196557	-0,02984789
1,26661767	1,23428695	-0,03233072

bande commune

ω_j	ω_{j+1}	$\omega_{j+1} - \omega_j$
0	0	0

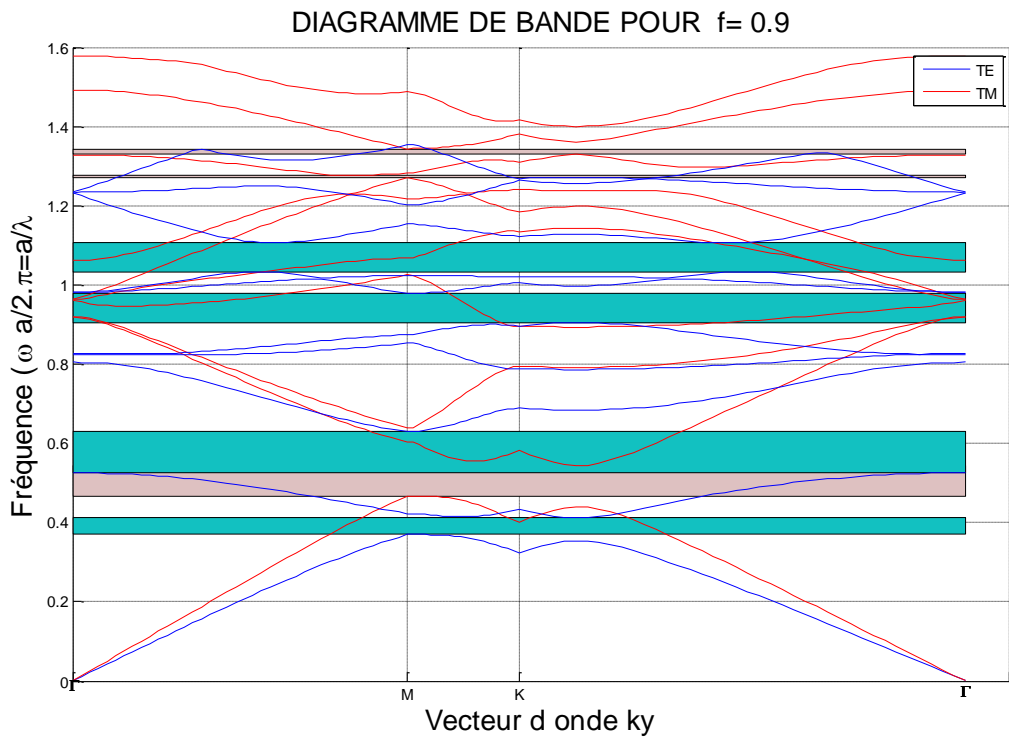


Figure 4-8 : Diagramme de bande d'un cristal photonique ,réseau triangulaire de trous d'air dans une matrice diélectrique (n=3.26) pour un facteur de remplissage de 90 %

4-5 Comportement de L largeur de la bande interdite en fonction du Facteur de remplissage Pour la première bande interdite

Facteur de remplissage	Largueur de la bande interdite TM	Largueur de la bande interdite TE	Largueur de la bande interdite commune
0.2	0,04000166	0,04000166	0,00649317
0.3	0,06793692	0,02084131	0,00992539
0.4	0,10013801	0,02549701	0,01214728
0.5	0,13525624	0,029136	0,01284678
0.6	0,16845625	0,03231061	0,01163537
0.7	0,18845923	0,03546292	0,00746605
0.8	0,17387638	0,03886554	0
0.9	0,07746318	0,04161296	0

4-5-1 Comportement de L BI TM en fonction du facteur de remplissage

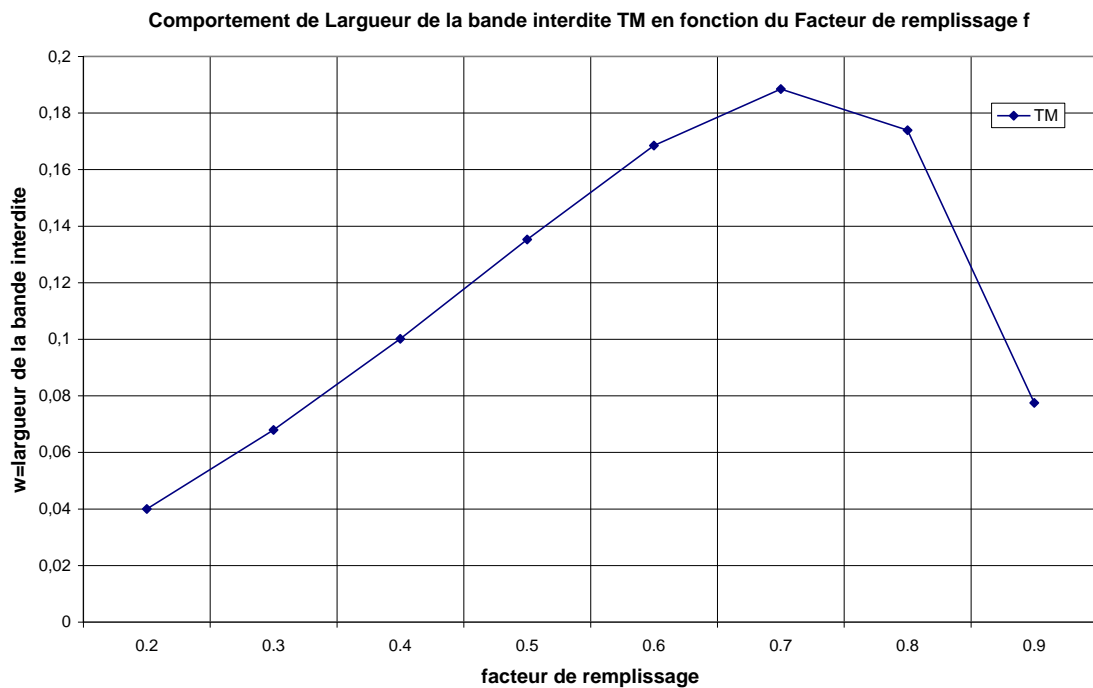


Figure 4-9 : L BI TM en fonction du facteur de remplissage

4-5-2 Comportement de L BI TE en fonction du facteur de remplissage

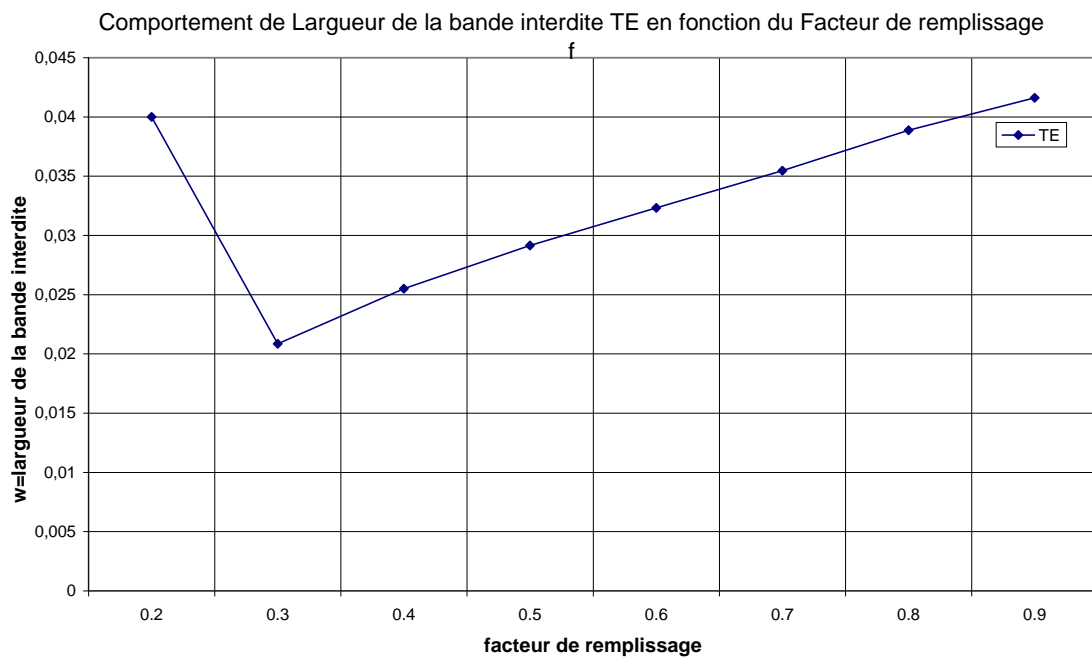


Figure 4-10 : L BI TE en fonction du facteur de remplissage

4-5-3 Comportement de L BI CM en fonction du facteur de remplissage

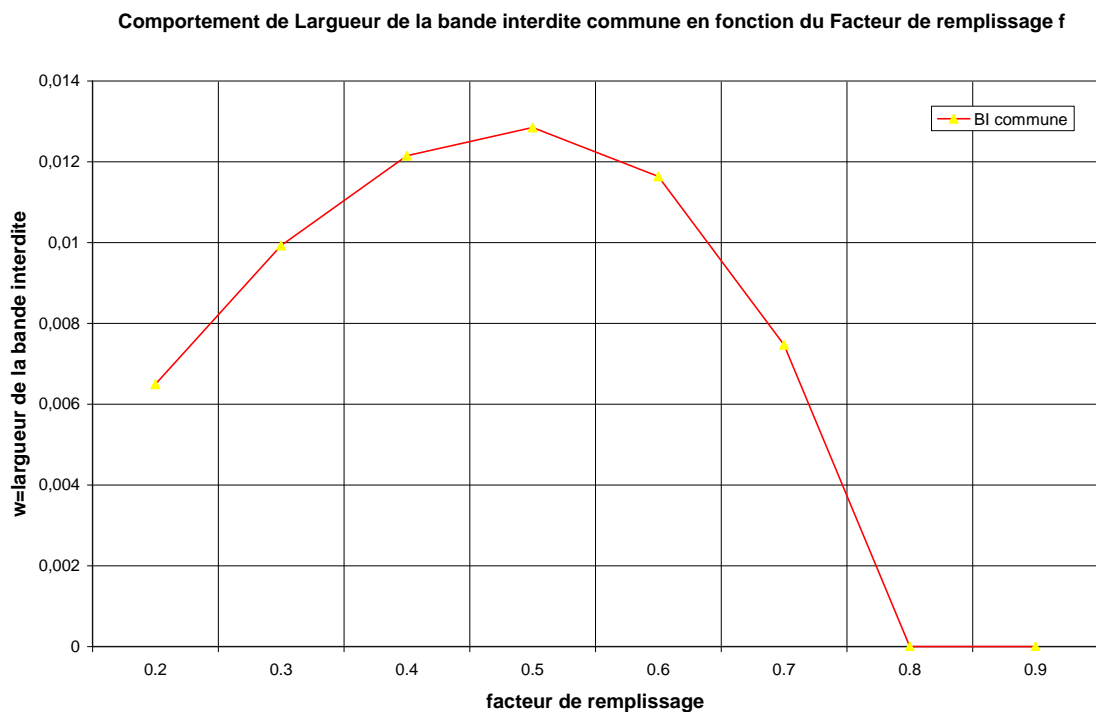


Figure 4-11 : L BI CM en fonction du facteur de remplissage

4-6 Choix du Facteur de remplissage optimal

D'après les résultats obtenus on constate que le meilleur Facteur de remplissage et celui qui présente une largeur de bande interdite commune élevé ce qui correspond à $f=48\%$.

f=0.48		
TM	TE	bande commune
0,23161912	0,21600241	0,23161912
0,35977766	0,24446202	0,24446202
0,12815854	0,02845962	0,0128429

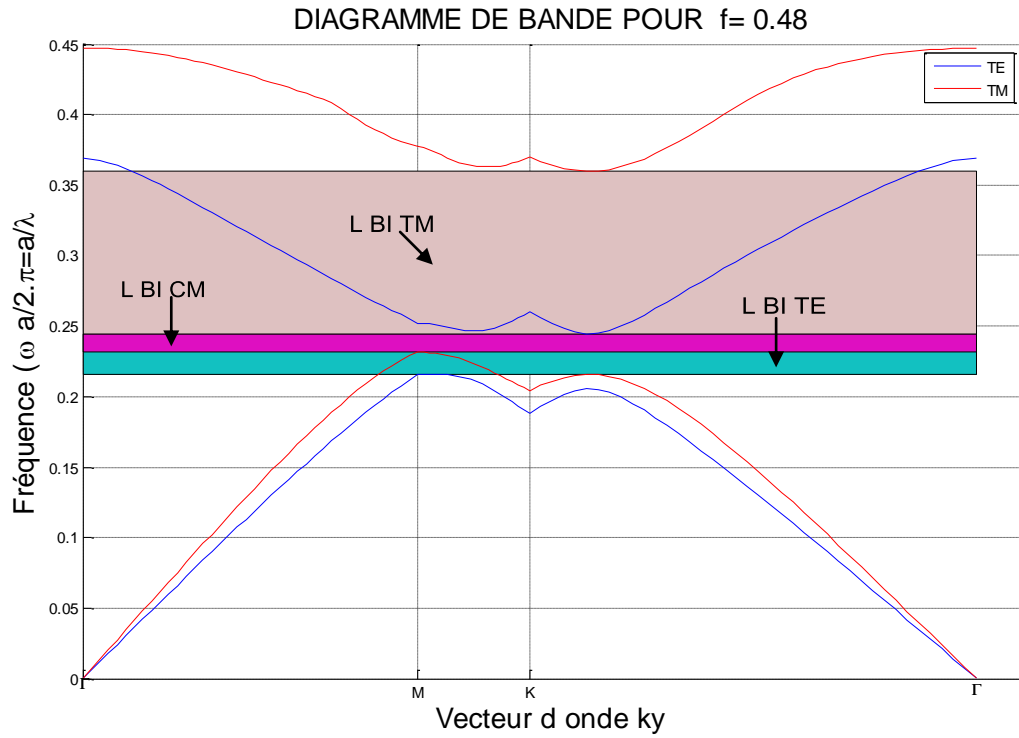


Figure 4-12 : Diagramme de bande pour un réseau triangulaire de trous d'air dans une matrice diélectrique ($n=3.26$) pour un facteur de remplissage de 48%

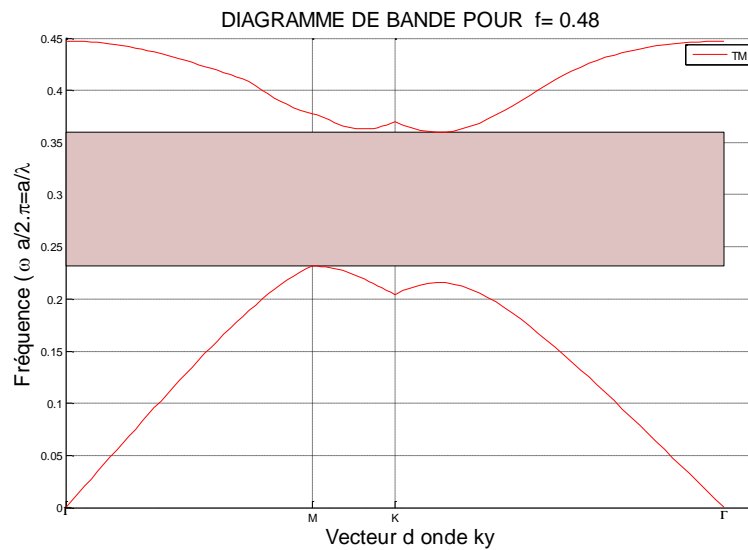


Figure 4-13 : Bande interdite TM,réseau triangulaire de trous d'air dans une matrice diélectrique (n=3.26) pour un facteur de remplissage de 48%

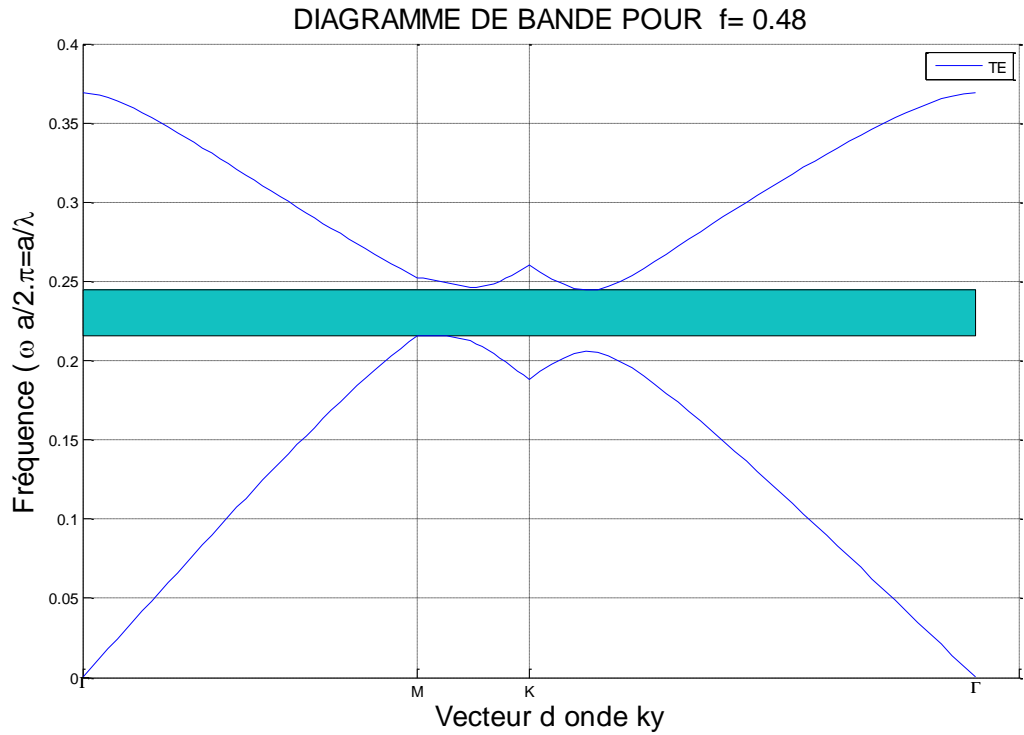


Figure 4-14 :Bande interdite TE,réseau triangulaire de trous d'air dans une matrice diélectrique (n=3.26) pour un facteur de remplissage de 48%

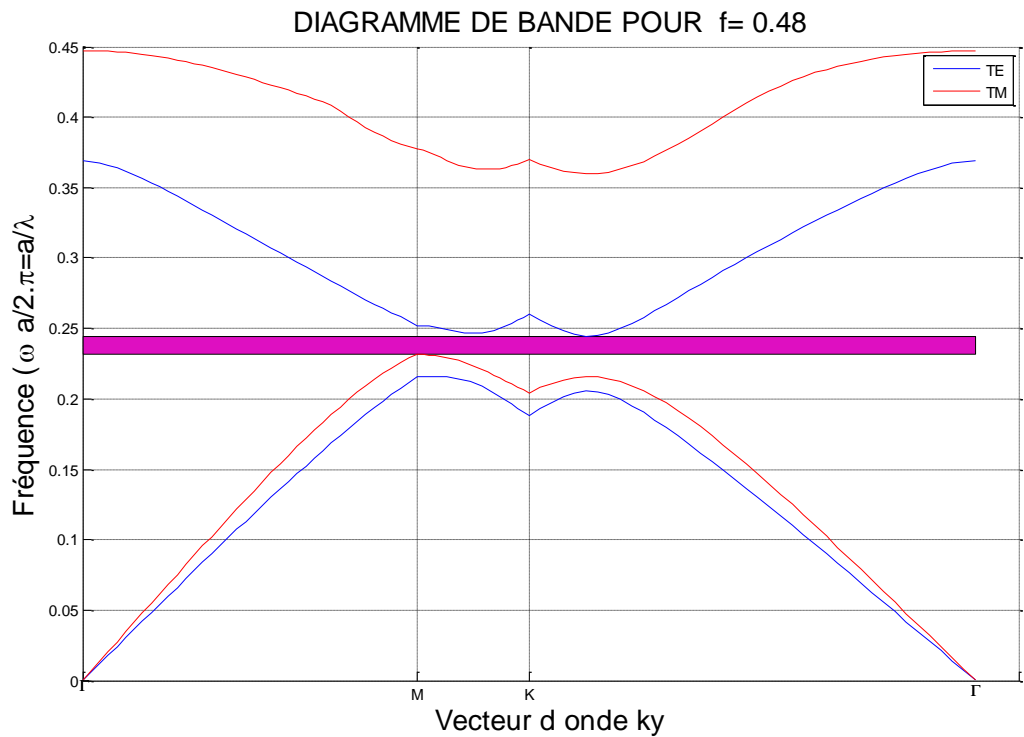


Figure 4-15: Bande interdite commune ,réseau triangulaire de trous d'air dans une matrice diélectrique (n=3.26) pour un facteur de remplissage de 48%

4-7 Calcul de l'indice de réfraction:

n	dw/dk	w
-0.01	-0.003609281	0.44736412
-0.03	-0.010683238	0.4473273
-0.05	-0.01773982	0.44721831
-0.07	-0.024767202	0.44703733
-0.10	-0.031753108	0.44678465
-0.12	-0.03868469	0.44646071
-0.14	-0.04554845	0.44606604
-0.16	-0.052330226	0.44560136
-0.18	-0.05901523	0.44506748
-0.20	-0.065588147	0.4444654
-0.22	-0.07203329	0.44379627
-0.24	-0.078334792	0.44306138
-0.25	-0.084476838	0.44226221
-0.27	-0.090443909	0.44140037
-0.29	-0.096221032	0.44047766
-0.31	-0.101794021	0.43949601
-0.32	-0.1071497	0.4384575
-0.34	-0.112276089	0.43736436
-0.35	-0.11716256	0.43621891
-0.37	-0.121799947	0.43502362
-0.38	-0.126180618	0.43378101
-0.39	-0.130298504	0.43249371
-0.40	-0.134149103	0.4311644
-0.41	-0.137729443	0.4297958
-0.42	-0.141038047	0.42839068
-0.43	-0.144074886	0.42695181
-0.44	-0.146841365	0.42548195
-0.45	-0.149340381	0.42398387
-0.45	-0.151576537	0.42246029
-0.46	-0.153556738	0.4209139
-0.47	-0.155291696	0.41934731
-0.47	-0.156799944	0.41776301
-0.47	-0.158120041	0.41616334
-0.48	-0.159356401	0.41455019
-0.48	-0.160928835	0.41292443
-0.50	-0.166570151	0.41128263
-0.75	-0.250233396	0.40958327
-0.98	-0.327699012	0.40703038
-0.96	-0.320743276	0.40368718
-0.92	-0.308023398	0.40041494
-0.88	-0.293358152	0.39727248
-0.83	-0.277079154	0.39427962
-0.78	-0.259198407	0.39145285
-0.72	-0.239672551	0.3888085
-0.66	-0.218458177	0.38636335
-0.59	-0.195534336	0.38413463
-0.51	-0.170917983	0.38213978
-0.43	-0.144677233	0.38039607
-0.35	-0.116942641	0.37892007

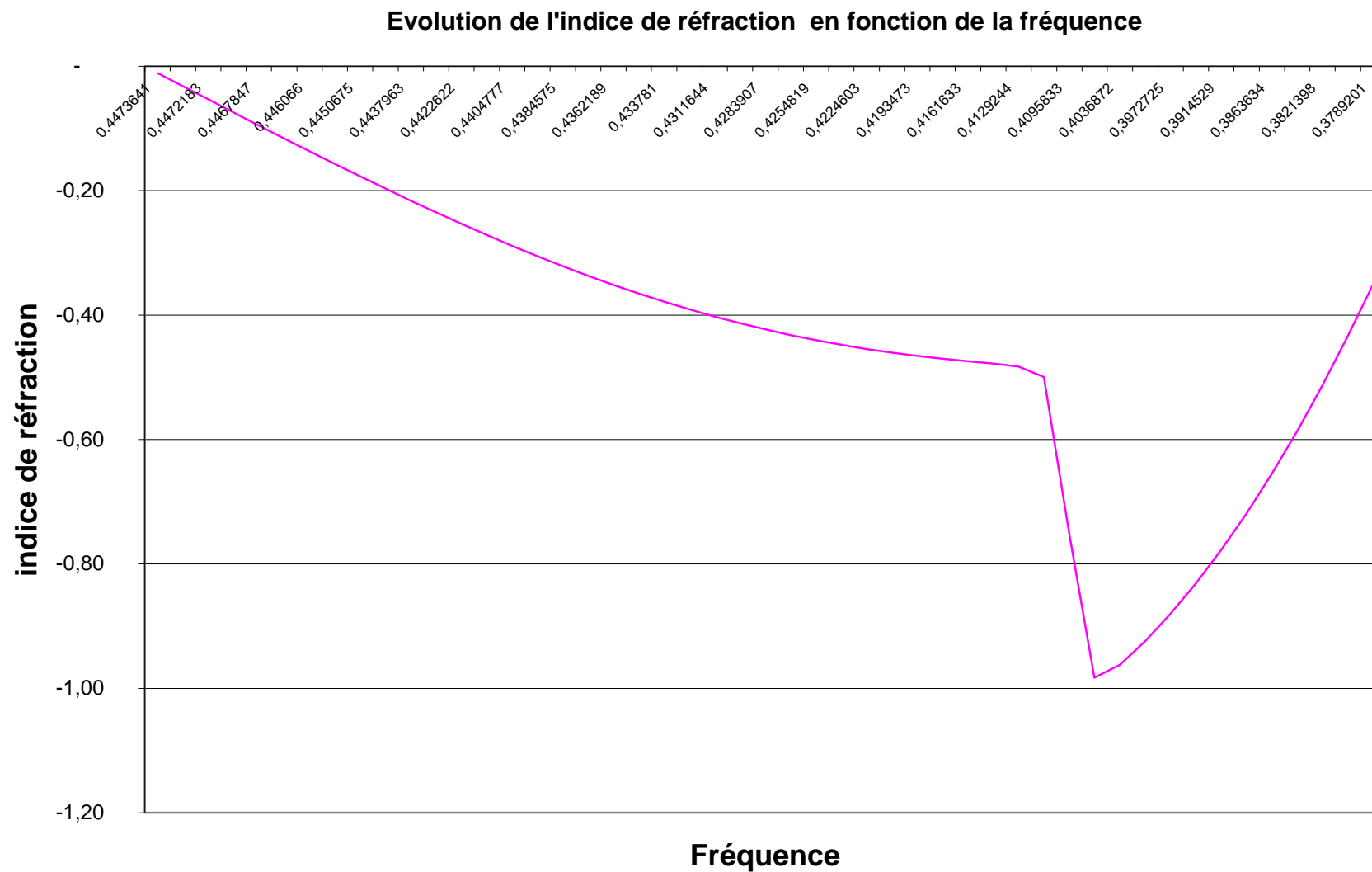


Figure 4-16 Evolution de l'indice de réfraction en fonction de la fréquence

4-7 Interprétations des résultats et conclusion

Les différents calculs de simulation et l'étude paramétrique basée sur le changement des facteurs de remplissage entre 20% et 90% ont abouti au choix qui présente la plus grande largeur de bande interdite commune en TM et TE.

Pour des fréquences appartenants à la seconde bande permise pour la direction ΓM du cristal photonique. On remarque qu'il présente une inversion de courbure,

Le calcul fait par des simulations basé sur la méthode des ondes planes appliquée dans nos calculs, pour un cristal photonique constitué de troue d'air percés dans une matrice diélectrique pour un réseau triangulaire. Montre que la vitesse de groupe est négative pour des fréquences dans la direction ΓM de la zone de brouilouin.

La figure qui présente la structure de bande photonique pour un facteur de remplissage de 50% qui présente en polarisation TM une large bande interdite qui s'étend de 0.23 à 0.37 soit une largeur de 0.135 montré précédemment par les différents essais de simulations qui ont abouti à ce choix, qui est le même pour de nombreuses recherches publiées dans ce domaine de simulation basé sur la méthode des ondes planes pour les cristaux photoniques [3].

Ainsi, la vitesse du groupe correspond à la pente de courbe de dispersion, par l'analyse des différents diagrammes de bandes et après calcul de la pente de la deuxième bande permise dans la direction ΓM dans une gamme de fréquences où cette vitesse est négative.

Pour cette gamme de fréquences qu'on peut définir des indices de réfractons négatifs, on remarque aussi que dans cette région se présente une bande interdite TE qui s'étend de 0.218 et 0.247 soit une largeur de 0.029. En remarque aussi qu'il existe une bande interdite commune c'est-à-dire ente la bande interdite TM et la bande interdite TE qui s'étend entre 0.235 et 0.247 soit une largeur de 0,0128.

La figure 4-16 montre l'évolution de l'indice de réfraction en fonction des fréquences qui correspondent aux vecteurs d'ondes dans la zone ΓM qui présente des indices de réfractons négatifs qui tendent vers -1, ce qui favorise notre application c'est la réalisation de la lentille parfaite.

Conclusion générale et perspectives

L'objectif de cette thèse est d'étudier les métamatériaux qui présentent une permittivité et perméabilité simultanément négatives et les appliquer à la réalisation d'une lentille parfaite. Pour commencer, nous avons présenté dans le chapitre un, une synthèse bibliographique sur les métamatériaux et les cristaux photoniques et dans le deuxième chapitre les méthodes numériques et les différents outils de simulation pour le calcul de la permittivité et la perméabilité.

La deuxième partie de cette thèse nous avons présenté les résultats de simulation pour deux approches, par la conception d'un modèle numérique sous Matlab pour faire une étude paramétrique détaillée sur différents motifs comme les tiges métalliques et les SRRs pour l'approche métallique et un autre pour la simulation du modèle diélectrique basé sur le calcul du diagramme de bande par la méthode des ondes planes.

Ces résultats ont par la suite été utilisés afin d'extraire les différents paramètres tels que la permittivité et la perméabilité pour l'approche métallique et la vitesse de groupe, l'indice de réfraction pour l'approche diélectrique. à partir de là, nous avons fait notre choix sur les structures qui correspondaient au mieux à nos attentes en performances pour l'application envisagée.

Dans le troisième chapitre nous avons fait une étude paramétrique sur les tiges métalliques suivant le modèle de Drude, les résultats de simulation nous donnent pour la plage des rayons allant de 41 à 81 nm correspondants à un pas allant de 300 à 600 nm une permittivité négative proche de -1, et une autre suivant Maslovski qui donnent pour les rayons allant de 61 à 81 nm correspondante à un pas allant de 300 à 350 nm. Nous avons ensuite comparé les résultats obtenus qui favorisent le choix du modèle de Drude, qui permet une large gamme de choix du rayon r et le pas a .

En outre la perméabilité est donnée par le modèle de Lorentz. Par l'étude paramétrique d'un SRR, pour des valeurs du rayon entre 30 et 80 nm et la distance d entre les deux anneaux allant de 1,5 à 4,5 nm qui nous permettent d'avoir une perméabilité égale à -1.

En dernier lieu, nous nous sommes consacrés à l'étude des structures diélectriques comme les cristaux photoniques, en utilisant les diagrammes de bande pour la recherche des bandes interdites TE et TM possible, ainsi que les bandes interdites communes, les résultats obtenus ont abouti au choix de la structure qui représente un facteur de remplissage de 50% qui présente une bande interdite commune la plus large soit une largeur de 0,0128.

Ces résultats de simulations concordent avec beaucoup de résultats de recherches faites dans le domaine des métamatériaux [3].

Notre perspective est de continuer les recherches sur ce domaine et d'appliquer d'autres méthodes numériques pour la modélisation et les simulations des métamatériaux et en particulier la FDTD.

Bibliographie

- [1] V. G. Veselago, *Sov. Phys. Usp.* 10, 509 (1968)
- [2] J. P. Pendry, *Phys. Rev. Lett.* 85, 3966 (2000)
- [3] Nathalie FABRE, «Matériaux Main Gauche Et Cristaux Photoniques Pour L'optique : Approche Diélectrique», Thèse de doctorat, Soutenue le 4 décembre 2008 , Université des sciences et technologies de Lille
- [4] Abdelilah MEJDOUBI, « Étude Par simulation numérique des propriétés diélectriques d'hétérostructures multiphasiques contenant des inclusions de forme arbitraire », Thèse de doctorat, Soutenue Le 20 Juin 2007, Université De Bretagne Occidentale, École Doctorale Sciences De la Matière, De l'Information et de la Santé.
- [5] Éric LHEURETTE, «Metamateriaux A Indice Négatif De Réfraction:Des Micro-ondes Aux Fréquences Téràhertz », Habilitation A Diriger Des Recherches En Sciences Physiques, Présentée Le 11 Juin 2009, Université De Lille 1.
- [6] Charles CROENNE, « Contrôle de la propagation et du rayonnement électromagnétiques par les Metamateriaux», Thèse de doctorat, Soutenue le 23 octobre 2009, Université De Lille 1, Ecole Doctorale Sciences Pour l'Ingénieur .
- [7] Gregory HOUZET, «Déphasage composite accordable et routage spatial par la technologie des Metamateriaux»,Thèse de doctorat, soutenue le 22 Octobre 2009, Université De Lille 1.
- [8] R. A. Shelby, D. R. Smith, and S. Schultz, "Experimental verification of a negative index of refraction," *Science*, pp. 77-79, 2001.
- [9] Tie Jun Cui, David R. Smith, Ruopeng Liu , "Metamaterials Theory, Design, and Application", Springer Science+Business Media, LLC 2010
- [10] A. K. Sarychev and V. M. Shalaev, "Comments on [66]", e-print cond-mat/0103145, March 2001.
- [11] S. I. Maslovski, S. A. Tretyakov, and P. A. Belov, "Wire media with negative effective permittivity : A quasi-static model", *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 35, no. 1, pp.47–51, October 2002.
- [12] Olivier REYNET, «métamatériaux à base d'éléments ferromagnétique et électronique », Thèse de doctorat, Soutenue le 11 septembre 2003, Université De Bretagne Occidentale, École Doctorale Sciences De la Matière, De l'Information et du vivant.
- [13] S. John, "Strong localization of photons in certain disordered dielectric photonic lattices", *Phys. Rev. Lett.* 1987, vol. 58, n°23, pp. 2486-2489
- [14] E. Yablonovich, "Inhibited spontaneous emission in solid state physics and electronics", *Phys. Rev. Lett.* 1987, vol. 58, n°20, pp. 2059-2062
- [15] Delphine NEEL, «Etude en champ proche optique de guides à cristaux photoniques sur SOI», Thèse de doctorat, Soutenue le 21 Novembre 2006 , Institut national des sciences appliquées de Lyon.
- [16] Pascal MASSÉ, «Cristaux photoniques colloïdaux d'architecture contrôlée », Thèse de doctorat , Soutenue le 15 Juin 2007, l'Université BORDEAUX I, École Doctorale Des Sciences Chimiques
- [17] J-P. Bérenger, *J. Computational Physics*, 114, 185 (1994).
- [18] Arnel LABBANI, «Matériaux bip a base de nanoparticules métalliques et semiconductrices étude des propriétés optiques par FDTD», Thèse de doctorat, 2009, Université Mentouri Constantine –Faculté des Sciences de l'Ingénieur Département d'Electronique .
- [19] Sabina ORLOWSKA , «Conception et prédiction des caractéristiques diélectriques des matériaux composites a deux et trois phases par la modélisation et la validation expérimentale», Thèse de doctorat, Soutenue le 31 janvier 2003, ECOLE CENTRALE DE LYON .
- [20] V. Myroshnychenko et C. Brosseau, *Phys. Rev. E* 71, 016701 (2005).
- [21] V. Myroshnychenko et C. Brosseau, *J. Appl. Phys.* 97, 044101 (2005).

- [22] S. K. Yee, "Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media". IEEE Trans. Antennas and propagation, Vol. 14, pp 302-307,(1966).
- [23] M.Qiui, S.He, "A nonorthogonal finite-difference time-domain method for computing the band structure of a two-dimensional photonic crystal with dielectric and metallic inclusion" J. Appl. Phys. 87, pp. 8268-8275, (2000)
- [24] A. Lavrinenko, P.I. Borel, L.H. Frandsen, M.Thorhauge, A. Haroth, M. Kristensen, T.Niemi, "Comprehensive FDTD modelling of photonic crystal waveguide components", Optic Express, Vol. 12, N°. 2. pp. 234-248, (2004).
- [25] A. Taflov and S. C. Hagness, "Computational Electrodynamics the finite-difference time- domain Method" 2 edition, Artech House Publishers, Boston, (2000).
- [26] C.T.Chan, Q.L. Yu et K.M.Ho, "Order N spectral method for electromagnetic waves", Physical Review B, Vol. 51, pp. 16635 16642, (1995).
- [27] T. Briallat, "Définition, réalisation et caractérisation de matériaux à Bandes photoniques Interdites reconfigurables en Micro-ondes", thèse de Doctorat, Univ. de Paris, (2000).
- [28] R. Courant, K. Friedrichs et H. Lewy, Mathematische Annalen, vol. 100, No. 1, 32, (1928).
- [29] A. Taflove, Computational Electrodynamics-The Finite-Difference Time-Domain Method (Artech House Inc., Norwood MA, 1995) ; A Taflove et S. C. Hagness, Computational Electrodynamics : The Finite-Difference Time Domain Method (Artech House Publishers, Boston, 2000), 2nd ed.
- [30] Yannick MERLE, «Etude De la dispersion électromagnétique dans les matériaux périodiques diélectriques bidimensionnels», Thèse de doctorat, Soutenue le 20 Novembre 2003, Université De Limoges, Ecole Doctorale Science–Technologie–Santé, Faculté Des Sciences Et Techniques.
- [31] Shah Nawaz BUROKUR, «Mise En Œuvre De Métamatériaux En Vue D'application Aux Circuits Microondes Et Aux Antennes », Thèse De Doctorat, Le 25 Novembre 2005, Université De Nantes, Ecole doctorale ,sciences et technologies de l'information et des matériaux
- [32] E. N. Economou, Th. Koschny and C. M. Soukoulis , "Strong diamagnetic response in split-ring-resonator metamaterials: Numerical study and two-loop model", Physical Review B 77, 092401 (2008)
- [33] A. Ahmed and M. A. Alsunaidi, "Design of Wide-Band Metamaterials Based on the Split Ring", NATO ARW & META'08, Marrakesh - Morocco, 7-10 May 2008
- [34] Ko-Hsin LEE, «Investigation Et fabrication de structures en cristaux photoniques bidimensionnels pour émission de lumière et contrôle de mode optique à 1,55µm», Thèse de doctorat, Soutenue Le 30 Juin 2008, Université Paris XI ,UFR Scientifique d'Orsay.
- [35] Yassine BENACHOUR, «Optimisation de cristaux photoniques pour l'optique non linéaire», Thèse de doctorat, soutenue le 11 avril 2008, Université de Paris Sud 11.
- [36] Marc ZELSMANN, «Cristaux photoniques en silicium sur isolant pour le guidage, le filtrage, l'émission et l'extraction de lumière», Thèse de doctorat,Soutenue le 07 novembre 2003, Université Joseph Fourier – Grenoble 1
- [37] Olivier BOUCHARD, «Etude De diodes laser à cavité planaire entièrement définie par cristal photonique : Nouvelle approche pour le contrôle de l'émission», Thèse de doctorat,Soutenue le 11 Juillet 2008,Université Toulouse III–Paul Sabatier,Ecole Doctorale :Génie Electrique ,Electronique ,Télécommunications.
- [38] Remy BRAIVE, «Contrôle de l'émission spontanée dans les cristaux photoniques», Thèse de doctorat, Soutenue le 24 Novembre 2008, Université paris 7 – Denis Diderot UFR de physique.
- [39] Kevin VYNCK, «Propriétés optiques de matériaux diélectriques nanostructurés : Des cristaux photoniques aux métamatériaux», Thèse de doctorat, Soutenue le 12 novembre 2008, Université Montpellier II – Sciences Et Techniques Du Languedoc.
- [40] Jean-Jacques Bonnefois, «Modélisation d'effets non linéaires dans les cristaux photoniques, application à la limitation optique», Thèse de doctorat, Soutenue le 30 novembre 2006, Université de Paris X, Nanterre
- [41] Pierre-Henri Cocquet, Sur La modélisation mathématique et l'approximation numérique des métamatériaux , journées des Thèses 2011 Branche TIS (DCSD/DCPS/DTIM) 26 Janvier à Palaiseau et 7-8 Fevrier à Toulouse.
- [42] John D. Joannopoulos ,Steven G. Johnson , Joshua N. Winn, Robert D. Meade, "Photonic Crystals ,Molding the Flow of Light", 2008, PRINCETON UNIVERSITY PRESS.

- [43] Susan C.Hagness, Allen Taflove, Stephen D.Gedney, "Finite-Difference Time-Domain Methods", Handbook of Numerical analysis P.G Ciarlet (Editor), 2005 Elsevir B.V, Volume XIII- Numerical Methods in Electromagnetics, W.H.A. Schildesrs (Ed.)
- [44] Boukerzaza loubna, «Influence Des paramètres physiques sur la bande interdite Photonique d'un cristal photonique bidimensionnel à réseau hexagonal », Thèse de magister, 2007-2008, Université Mentouri Constantine, Faculté des Sciences De L'ingénieur Département D'électronique
- [45] Mahmoud Riad BEGHOUL, «Contribution a la réalisation de fonctions optoélectroniques a base de cristaux photoniques pour les télécommunications», Thèse de doctorat, Soutenu le 16 décembre 2008, Université Mentouri Constantine –Faculté des Sciences de l'Ingénieur Département d'Electronique
- [46] Marc ZELSMANN, «Cristaux photoniques en silicium sur isolant pour le guidage, le filtrage, l'émission et l'extraction de lumière», Thèse de doctorat, le 07 novembre 2003, Spécialité : Physique, Université Joseph Fourier – Grenoble 1.
- [47] BENDJELLOUL Rahima, «Etude du couplage dans les guides d'onde à cristaux photoniques», Thèse de Magister, Soutenu le 11 Novembre 2009, Université Mentouri Constantine –Faculté des Sciences de l'Ingénieur Département d'Electronique
- [48] Bougriou Feida, «Etude des guides d'ondes a cristaux photoniques bidimensionnels», Thèse de Magister, 2008, Université Mentouri Constantine –Faculté des Sciences de l'Ingénieur Département d'Electronique
- [49] Christophe Sauvan, «Etude De la propagation et du confinement de la lumière dans des nanostructures», Thèse de doctorat, Soutenu le 13 Octobre 2005, Université paris XI U.F.R. Scientifique d'Orsay.
- [50] Barbara WILD, «Etude expérimentale des propriétés optiques des cristaux photoniques bidimensionnels et de leur accordailles», Thèse de doctorat, Présentée le 13 Juillet 2006, Ecole polytechnique fédérale de lausanne.
- [51] Aroune DUCLOS, «Diffusion multiple en fluide visco-thermique, cas du cristal phononique a deux dimensions», Thèse de doctorat, soutenue le 27 juin 2007, Académie de Nantes- Ecole doctorale de l'université du Maine .
- [52] Wojciech SMIGAJ, «Conception et modélisation numérique de composants optiques en nanophotonique intégrée», Thèse de doctorat, Soutenu le 22 septembre 2010, Université Paul Cezanne (Aix-Marseille III).
- [53] Sandrine MASSY, «Contribution à la réalisation de fonctions optiques à base de cristaux photoniques sur LiNbO₃», Thèse de doctorat, 2004, Université de limoges- Ecole doctorale Science – Technologie – Santé, Faculté des Sciences et Techniques .
- [54] Damien BERNIER, «Propriétés de superprisme des cristaux photoniques sur substrats Sol pour le démultiplexage en longueur d'onde», Thèse de doctorat, Soutenu le 12 décembre 2008, Université Paris Sud XI, Orsay.
- [55] J.B. Pendry, "Negative Refraction Makes a Perfect Lens", Physical Review Letters, Volume 85, Number 18 (2000).
- [56] Belkhir Abderrahmane, «Extension De la modélisation par FDTD En nano-optique», Thèse de doctorat, soutenue le 26 Novembre 2008, Université De Franche-Comté École Doctorale SPIM
- [57] S Anantha Ramakrishna, "Physics of negative refractive index materials", Institute of physics publishing, Rep. Prog. Phys. 68(2005)449-521 .
- [58] BENMERKHI Ahlem, «Influence des paramètres géométriques sur la cavité a cristaux photoniques bidimensionnels», Thèse de Magister, 2008, Université Mentouri Constantine –Faculté des Sciences de l'Ingénieur Département d'Electronique .
- [59] Christophe BOUREL, «Etude mathématique et numérique de cristaux photoniques fortement contrastes», Thèse de doctorat, Soutenu le 13 décembre 2010, Université Du Sud Toulon-Var, U.F.R. Sciences et techniques
- [60] E. Ozbay, I. Bulu, K. Aydin, H. Caglayan, K. B. Alici, and K. Guven, Highly "Directive Radiation and Negative Refraction Using Photonic Crystals", Laser Physics, Vol. 15, No.2, 2005, pp. 217-224.
- [61] A-C. Hladky-Hennion, J. Vasseur, C. Croenne, J.-P. Groby, B. Dubus, B. Djafari-Rouhani, B. Morvan, A. Tinel, "Réfraction négative d'ondes transverses dans les cristaux phononiques", 10ème Congrès Français d'Acoustique Lyon, 12-16 Avril 2010 .
- [62] Daniel Maystre, Stefan Enoch, Boris Gralak, Gerard Tayeb, "Metamaterials: from microwaves to the visible region", C. R. Physique 6 (2005) 693-701

- [63] Ashwin K. Iyer and George V. Eleftheriades, “Negative Refractive Index Metamaterials Supporting 2-D Waves”, 0-7803-7240-9/02 © 2002 IEEE
- [64] Thierry TALIERCIO, Vilianne N’TSAME GULENGUI, “Métamatériau à bande interdite photonique ajustable à base de réseau métal-diélectrique”
- [65] S Anantha Ramakrishna, “Physics of negative refractive index materials”, INSTITUTE OF PHYSICS PUBLISHING, Rep. Prog. Phys. 68 (2005) 449–521
- [66] T. F. Gundogdu, N. Katsarakis, M. Kafesaki, R. S. Penciu, G. Konstantinidis , A. Kostopoulos, E. N. Economou, and C. M. Soukoulis , “Negative index short-slab pair and continuous wires metamaterials in the far infrared regime”, Opt. Express 12,9173(2008).
- [67] FABRICE RAINERI, «Optique Non linéaire dans les cristaux photoniques en semiconducteur III-V», Thèse de doctorat, Soutenue Le 22 Décembre 2004, Université De Paris Xi Orsay.
- [68] Davy Gerard, «Etude en champ proche et en champ lointain de composants périodiquement nanostructures :cristaux photoniques et tamis à photons», Thèse de doctorat,Soutenue le 9 juillet 2004 ,Ecole doctorale carnot ,laboratoire de physique de l’université de Bourgogne.
- [69] Abdelwaheb Ourir, «Applications De Matériaux A Bandes Interdites Photoniques Et de Métamatériaux en Télécommunications», Thèse de doctorat, Soutenue Le 5 décembre 2006, Université Paris Sud XI ,Faculté des Sciences d’Orsay.
- [70] Jérémi TORRES, «Exaltation De la Génération De Second Harmonique Dans les Cristaux Photoniques A Base De Nitrures », Thèse de doctorat, soutenue 29 Juin 2004, Academie De Montpellier ,Université Montpellier Ii - Sciences Et Techniques Du Languedoc
- [71] Michaël Bahriz, «Lasers à cascade quantique à plasmons de surface et leurs applications aux cristaux photoniques», Thèse de doctorat, soutenue Le 14 Mai 2008 , Université Paris Sud ,UFR Scientifique d’Orsay.
- [72] Loic LALOUAT, « Interaction en champ proche entre une sonde nanométrique et le champ de composants a cristal photonique : - interaction faible, microscopie spatialement hautement résolue. – interaction forte, contrôle des propriétés du composant », Thèse de doctorat, Soutenue le 4 Avril 2008, Université de Bourgogne.
- [73] Michel-Francois FOULON, «Metamateriaux TéraHertz en régime linéaire et non linéaire», Thèse de doctorat, soutenue le 20 novembre 2008, Université Des Sciences Et Technologies De Lille
- [74] Salim Boutami, «Microcavités Optiques Verticales A Base De Cristaux Photoniques Membranaires», Thèse De Doctorat, 25 Novembre 2008, Ecole Centrale De Lyon
- [75] Samuel NOSAL,« Modélisation électromagnétique de structures périodiques et matériaux artificiels Application à la conception d'un radôme passe-bande», Thèse de doctorat, Soutenue le 30 septembre 2009, École Centrale Paris -Ecole Doctorale N°287 "Sciences pour l'ingénieur" .
- [76] Samuel NOSAL, «Modélisation électromagnétique de structures périodiques et matériaux artificiels Application a la conception d'un radome passe-bande», Thèse de doctorat, Soutenue le 30 septembre 2009, Ecole Centrale Paris, Ecole Doctorale n °287 "Sciences pour L'ingénieur"
- [77] Benoit lombardet, «Etude Et Réalisation De Cristaux Photoniques Pour L'optique Intégrée», thèse de doctorat,N° 3254 (2005) , école polytechnique fédérale de Lausanne, institut de photonique et d'électronique quantiques.
- [78] Merdjana Toufik, «ÉTUDE DES CARACTERISTIQUES DE TRANSMISSION DANS UN METAMATERIAU», Thèse de Magister, Université Mantouri Constantine ,faculté du sciences de l’ingénieur.
- [79] BOUCHER Vincent, «Modélisation Des Propriétés électromagnétiques De Metamateriaux à Base De Réseaux De Fils Ferromagnétiques», Thèse de Philosophiæ Doctor,Octobre 2010 , Université De Montréal.
- [80] Thibaut DECOOPMAN, «Multiplicateurs de frequences et metamateriaux en technologie finline», Thèse de doctorat, soutenue le 29 octobre 2004 , Université Des Sciences Et Technologies De Lille.
- [81] Alexandru Ioan Cabuz, «Electromagnetic Metamaterials From Photonic Crystals To Negative Index Composites», Thèse De Doctorat, Le 19 Juin 2007, Université Montpellier II Sciences Et Techniques Du Languedoc.
- [82] Jean-Jacques Bonnefois, «Modélisation D’effets Non Linéaires Dans Les Cristaux Photoniques, Application A La Limitation Optique», Thèse de doctorat,Soutenue le 30 novembre 2006, Université Paris X,Nanterre.

- [83] B.Kanté, S.N.Burokur, F.Gadot, A.De Lustrac, “Métamatériaux à indice de réfraction négatif en infrarouge”, IEF, Université Paris Sud, UMR 8622, 91405 Orsay, F-91405 ; CNRS.
- [84] Cornelia Denz ,Sergej flach,Yuri S.Kivshar , “Nlinearities in periodic structures and metamaterials”, Springer series in optical sciences,2008
- [85] Raphael PIERRE,« Propriétés effectives d'un cristal photonique .Extensions de la méthode des sources fictives. Application a l'étude du guidage de modes quasi- TEM uniformes.», Thèse de doctorat, Soutenu le 03 décembre 2008, UNIVERSITE PAUL CEZANNE Aix-Marseille III,Institut Fresnel Marseille.
- [86] Yannick POUJET, «Transmission exaltée a travers des tamis a photons a ouvertures annulaires nanométriques : simulation et caractérisation», Thèse de doctorat, soutenue le 14 décembre 2007, Université De Franche-Comté, École Doctorale SPIM.
- [87] Y. Wang, X. Wang, J. Rybczynski, D. Z.Wang, K.Kempa, and Z.F.Rena, Triangular lattice of carbon nanotube arrays for negative index of refraction and subwavelength lensing effect, Applied Physics Letters 86, 153120 (2005).

Annexes

Etude paramétrique d'un tige métallique

a	max epsilon	min epsilon
1,50E-07	0,9976371	-4,813381
r(nm)	omega(hz)	epsilon
1,00E-09	4E+14	0,9928597
1,00E-09	4,05E+14	0,9930323
1,00E-09	4,1E+14	0,9931986
1,00E-09	4,15E+14	0,9933591
1,00E-09	4,2E+14	0,993514
1,00E-09	4,25E+14	0,9936635
1,00E-09	4,3E+14	0,9938079
1,00E-09	4,35E+14	0,9939474
1,00E-09	4,4E+14	0,9940823
1,00E-09	4,45E+14	0,9942127
1,00E-09	4,5E+14	0,9943388
1,00E-09	4,55E+14	0,9944608
1,00E-09	4,6E+14	0,994579
1,00E-09	4,65E+14	0,9946934
1,00E-09	4,7E+14	0,9948042
1,00E-09	4,75E+14	0,9949116
1,00E-09	4,8E+14	0,9950157
1,00E-09	4,85E+14	0,9951166
1,00E-09	4,9E+14	0,9952145
1,00E-09	4,95E+14	0,9953095
1,00E-09	5E+14	0,9954017
1,00E-09	5,05E+14	0,9954912
1,00E-09	5,1E+14	0,9955781
1,00E-09	5,15E+14	0,9956625
1,00E-09	5,2E+14	0,9957445
1,00E-09	5,25E+14	0,9958242
1,00E-09	5,3E+14	0,9959017
1,00E-09	5,35E+14	0,9959771
1,00E-09	5,4E+14	0,9960504
1,00E-09	5,45E+14	0,9961217
1,00E-09	5,5E+14	0,9961911
1,00E-09	5,55E+14	0,9962587
1,00E-09	5,6E+14	0,9963244
1,00E-09	5,65E+14	0,9963885
1,00E-09	5,7E+14	0,9964509
1,00E-09	5,75E+14	0,9965117
1,00E-09	5,8E+14	0,9965709
1,00E-09	5,85E+14	0,9966287
1,00E-09	5,9E+14	0,996685
1,00E-09	5,95E+14	0,9967399
1,00E-09	6E+14	0,9967934
1,00E-09	6,05E+14	0,9968456
1,00E-09	6,1E+14	0,9968966
1,00E-09	6,15E+14	0,9969464
1,00E-09	6,2E+14	0,9969949
1,00E-09	6,25E+14	0,9970423
1,00E-09	6,3E+14	0,9970886
1,00E-09	6,35E+14	0,9971338
1,00E-09	6,4E+14	0,997178
1,00E-09	6,45E+14	0,9972212
1,00E-09	6,5E+14	0,9972634
1,00E-09	6,55E+14	0,9973046
1,00E-09	6,6E+14	0,9973449
1,00E-09	6,65E+14	0,9973843
1,00E-09	6,7E+14	0,9974228
1,00E-09	6,75E+14	0,9974605
1,00E-09	6,8E+14	0,9974974
1,00E-09	6,85E+14	0,9975334
1,00E-09	6,9E+14	0,9975687
1,00E-09	6,95E+14	0,9976033
1,00E-09	7E+14	0,9976371

permittivité suivant Drude

r(nm)	omega(hz)	epsilon
2,10E-08	4E+14	-2,0541602
2,10E-08	4,05E+14	-1,9814283
2,10E-08	4,1E+14	-1,9112647
2,10E-08	4,15E+14	-1,8435497
2,10E-08	4,2E+14	-1,7781708
2,10E-08	4,25E+14	-1,7150217
2,10E-08	4,3E+14	-1,654002
2,10E-08	4,35E+14	-1,5950171
2,10E-08	4,4E+14	-1,5379775
2,10E-08	4,45E+14	-1,4827986
2,10E-08	4,5E+14	-1,4294002
2,10E-08	4,55E+14	-1,3777066
2,10E-08	4,6E+14	-1,3276459
2,10E-08	4,65E+14	-1,2791501
2,10E-08	4,7E+14	-1,2321546
2,10E-08	4,75E+14	-1,1865981
2,10E-08	4,8E+14	-1,1424225
2,10E-08	4,85E+14	-1,0995725
2,10E-08	4,9E+14	-1,0579955
2,10E-08	4,95E+14	-1,0176418
2,10E-08	5E+14	-0,9784636
2,10E-08	5,05E+14	-0,9404158
2,10E-08	5,1E+14	-0,9034553
2,10E-08	5,15E+14	-0,867541
2,10E-08	5,2E+14	-0,8326339
2,10E-08	5,25E+14	-0,7986966
2,10E-08	5,3E+14	-0,7656935
2,10E-08	5,35E+14	-0,7335906
2,10E-08	5,4E+14	-0,7023555
2,10E-08	5,45E+14	-0,6719572
2,10E-08	5,5E+14	-0,642366
2,10E-08	5,55E+14	-0,6135536
2,10E-08	5,6E+14	-0,585493
2,10E-08	5,65E+14	-0,5581581
2,10E-08	5,7E+14	-0,5315242
2,10E-08	5,75E+14	-0,5055676
2,10E-08	5,8E+14	-0,4802653
2,10E-08	5,85E+14	-0,4555957
2,10E-08	5,9E+14	-0,4315377
2,10E-08	5,95E+14	-0,4080714
2,10E-08	6E+14	-0,3851775
2,10E-08	6,05E+14	-0,3628375
2,10E-08	6,1E+14	-0,3410337
2,10E-08	6,15E+14	-0,3197491
2,10E-08	6,2E+14	-0,2989673
2,10E-08	6,25E+14	-0,2786726
2,10E-08	6,3E+14	-0,2588498
2,10E-08	6,35E+14	-0,2394846
2,10E-08	6,4E+14	-0,2205628
2,10E-08	6,45E+14	-0,2020711
2,10E-08	6,5E+14	-0,1839965
2,10E-08	6,55E+14	-0,1663266
2,10E-08	6,6E+14	-0,1490493
2,10E-08	6,65E+14	-0,1321532
2,10E-08	6,7E+14	-0,1156271
2,10E-08	6,75E+14	-0,0994602
2,10E-08	6,8E+14	-0,0836423
2,10E-08	6,85E+14	-0,0681633
2,10E-08	6,9E+14	-0,0530136
2,10E-08	6,95E+14	-0,0381841
2,10E-08	7E+14	-0,0236656

ANNEXE 1

r(nm)	omega(hz)	epsilon
4,10E-08	5,65E+14	-4,813381
4,10E-08	5,7E+14	-4,7150296
4,10E-08	5,75E+14	-4,6191539
4,10E-08	5,8E+14	-4,5256716
4,10E-08	5,85E+14	-4,4345036
4,10E-08	5,9E+14	-4,3455741
4,10E-08	5,95E+14	-4,2588105
4,10E-08	6E+14	-4,1741429
4,10E-08	6,05E+14	-4,0915043
4,10E-08	6,1E+14	-4,0108304
4,10E-08	6,15E+14	-3,9320594
4,10E-08	6,2E+14	-3,8551319
4,10E-08	6,25E+14	-3,7799908
4,10E-08	6,3E+14	-3,7065812
4,10E-08	6,35E+14	-3,6348502
4,10E-08	6,4E+14	-3,5647472
4,10E-08	6,45E+14	-3,4962231
4,10E-08	6,5E+14	-3,4292309
4,10E-08	6,55E+14	-3,3637253
4,10E-08	6,6E+14	-3,2996626
4,10E-08	6,65E+14	-3,2370007
4,10E-08	6,7E+14	-3,175699
4,10E-08	6,75E+14	-3,1157185
4,10E-08	6,8E+14	-3,0570215
4,10E-08	6,85E+14	-2,9995715
4,10E-08	6,9E+14	-2,9433336
4,10E-08	6,95E+14	-2,8882737
4,10E-08	7E+14	-2,8343594

Etude paramétrique d'un tige métallique

a	max epsilon	min epsilon
3,00E-07	0,999409	-4,826545
r(nm)	omega(hz)	epsilon
1,00E-09	4E+14	0,998215
1,00E-09	4,05E+14	0,998258
1,00E-09	4,1E+14	0,9983
1,00E-09	4,15E+14	0,99834
1,00E-09	4,2E+14	0,998378
1,00E-09	4,25E+14	0,998416
1,00E-09	4,3E+14	0,998452
1,00E-09	4,35E+14	0,998487
1,00E-09	4,4E+14	0,998521
1,00E-09	4,45E+14	0,998553
1,00E-09	4,5E+14	0,998585
1,00E-09	4,55E+14	0,998615
1,00E-09	4,6E+14	0,998645
1,00E-09	4,65E+14	0,998673
1,00E-09	4,7E+14	0,998701
1,00E-09	4,75E+14	0,998728
1,00E-09	4,8E+14	0,998754
1,00E-09	4,85E+14	0,998779
1,00E-09	4,9E+14	0,998804
1,00E-09	4,95E+14	0,998827
1,00E-09	5E+14	0,99885
1,00E-09	5,05E+14	0,998873
1,00E-09	5,1E+14	0,998895
1,00E-09	5,15E+14	0,998916
1,00E-09	5,2E+14	0,998936
1,00E-09	5,25E+14	0,998956
1,00E-09	5,3E+14	0,998975
1,00E-09	5,35E+14	0,998994
1,00E-09	5,4E+14	0,999013
1,00E-09	5,45E+14	0,99903
1,00E-09	5,5E+14	0,999048
1,00E-09	5,55E+14	0,999065
1,00E-09	5,6E+14	0,999081
1,00E-09	5,65E+14	0,999097
1,00E-09	5,7E+14	0,999113
1,00E-09	5,75E+14	0,999128
1,00E-09	5,8E+14	0,999143
1,00E-09	5,85E+14	0,999157
1,00E-09	5,9E+14	0,999171
1,00E-09	5,95E+14	0,999185
1,00E-09	6E+14	0,999198
1,00E-09	6,05E+14	0,999211
1,00E-09	6,1E+14	0,999224
1,00E-09	6,15E+14	0,999237
1,00E-09	6,2E+14	0,999249
1,00E-09	6,25E+14	0,999261
1,00E-09	6,3E+14	0,999272
1,00E-09	6,35E+14	0,999283
1,00E-09	6,4E+14	0,999295
1,00E-09	6,45E+14	0,999305
1,00E-09	6,5E+14	0,999316
1,00E-09	6,55E+14	0,999326
1,00E-09	6,6E+14	0,999336
1,00E-09	6,65E+14	0,999346
1,00E-09	6,7E+14	0,999356
1,00E-09	6,75E+14	0,999365
1,00E-09	6,8E+14	0,999374
1,00E-09	6,85E+14	0,999383
1,00E-09	6,9E+14	0,999392
1,00E-09	6,95E+14	0,999401
1,00E-09	7E+14	0,999409

permittivité suivant Drude

r(nm)	omega(hz)	epsilon
2,10E-08	4E+14	0,23646
2,10E-08	4,05E+14	0,254643
2,10E-08	4,1E+14	0,272184
2,10E-08	4,15E+14	0,289113
2,10E-08	4,2E+14	0,305457
2,10E-08	4,25E+14	0,321245
2,10E-08	4,3E+14	0,336499
2,10E-08	4,35E+14	0,351246
2,10E-08	4,4E+14	0,365506
2,10E-08	4,45E+14	0,3793
2,10E-08	4,5E+14	0,39265
2,10E-08	4,55E+14	0,405573
2,10E-08	4,6E+14	0,418089
2,10E-08	4,65E+14	0,430212
2,10E-08	4,7E+14	0,441961
2,10E-08	4,75E+14	0,45335
2,10E-08	4,8E+14	0,464394
2,10E-08	4,85E+14	0,475107
2,10E-08	4,9E+14	0,485501
2,10E-08	4,95E+14	0,49559
2,10E-08	5E+14	0,505384
2,10E-08	5,05E+14	0,514896
2,10E-08	5,1E+14	0,524136
2,10E-08	5,15E+14	0,533115
2,10E-08	5,2E+14	0,541842
2,10E-08	5,25E+14	0,550326
2,10E-08	5,3E+14	0,558577
2,10E-08	5,35E+14	0,566602
2,10E-08	5,4E+14	0,574411
2,10E-08	5,45E+14	0,582011
2,10E-08	5,5E+14	0,589409
2,10E-08	5,55E+14	0,596612
2,10E-08	5,6E+14	0,603627
2,10E-08	5,65E+14	0,61046
2,10E-08	5,7E+14	0,617119
2,10E-08	5,75E+14	0,623608
2,10E-08	5,8E+14	0,629934
2,10E-08	5,85E+14	0,636101
2,10E-08	5,9E+14	0,642116
2,10E-08	5,95E+14	0,647982
2,10E-08	6E+14	0,653706
2,10E-08	6,05E+14	0,659291
2,10E-08	6,1E+14	0,664742
2,10E-08	6,15E+14	0,670063
2,10E-08	6,2E+14	0,675258
2,10E-08	6,25E+14	0,680332
2,10E-08	6,3E+14	0,685288
2,10E-08	6,35E+14	0,690129
2,10E-08	6,4E+14	0,694859
2,10E-08	6,45E+14	0,699482
2,10E-08	6,5E+14	0,704001
2,10E-08	6,55E+14	0,708418
2,10E-08	6,6E+14	0,712738
2,10E-08	6,65E+14	0,716962
2,10E-08	6,7E+14	0,721093
2,10E-08	6,75E+14	0,725135
2,10E-08	6,8E+14	0,729089
2,10E-08	6,85E+14	0,732959
2,10E-08	6,9E+14	0,736747
2,10E-08	6,95E+14	0,740454
2,10E-08	7E+14	0,744084

ANNEXE 1

r(nm)	omega(hz)	epsilon
4,10E-08	4E+14	-1,825479
4,10E-08	4,05E+14	-1,759128
4,10E-08	4,1E+14	-1,695089
4,10E-08	4,15E+14	-1,633255
4,10E-08	4,2E+14	-1,573527
4,10E-08	4,25E+14	-1,515809
4,10E-08	4,3E+14	-1,460012
4,10E-08	4,35E+14	-1,406052
4,10E-08	4,4E+14	-1,35385
4,10E-08	4,45E+14	-1,303329
4,10E-08	4,5E+14	-1,254418
4,10E-08	4,55E+14	-1,207049
4,10E-08	4,6E+14	-1,161159
4,10E-08	4,65E+14	-1,116686
4,10E-08	4,7E+14	-1,073572
4,10E-08	4,75E+14	-1,031763
4,10E-08	4,8E+14	-0,991207
4,10E-08	4,85E+14	-0,951853
4,10E-08	4,9E+14	-0,913655
4,10E-08	4,95E+14	-0,876568
4,10E-08	5E+14	-0,840549
4,10E-08	5,05E+14	-0,805558
4,10E-08	5,1E+14	-0,771556
4,10E-08	5,15E+14	-0,738506
4,10E-08	5,2E+14	-0,706372
4,10E-08	5,25E+14	-0,675122
4,10E-08	5,3E+14	-0,644722
4,10E-08	5,35E+14	-0,615143
4,10E-08	5,4E+14	-0,586355
4,10E-08	5,45E+14	-0,558331
4,10E-08	5,5E+14	-0,531042
4,10E-08	5,55E+14	-0,504465
4,10E-08	5,6E+14	-0,478574
4,10E-08	5,65E+14	-0,453345
4,10E-08	5,7E+14	-0,428757
4,10E-08	5,75E+14	-0,404788
4,10E-08	5,8E+14	-0,381418
4,10E-08	5,85E+14	-0,358626
4,10E-08	5,9E+14	-0,336394
4,10E-08	5,95E+14	-0,314703
4,10E-08	6E+14	-0,293536
4,10E-08	6,05E+14	-0,272876
4,10E-08	6,1E+14	-0,252708
4,10E-08	6,15E+14	-0,233015
4,10E-08	6,2E+14	-0,213783
4,10E-08	6,25E+14	-0,194998
4,10E-08	6,3E+14	-0,176645
4,10E-08	6,35E+14	-0,158713
4,10E-08	6,4E+14	-0,141187
4,10E-08	6,45E+14	-0,124056
4,10E-08	6,5E+14	-0,107308
4,10E-08	6,55E+14	-0,090931
4,10E-08	6,6E+14	-0,074916
4,10E-08	6,65E+14	-0,05925
4,10E-08	6,7E+14	-0,043925
4,10E-08	6,75E+14	-0,02893
4,10E-08	6,8E+14	-0,014255
4,10E-08	6,85E+14	0,000107
4,10E-08	6,9E+14	0,014167
4,10E-08	6,95E+14	0,027932

Etude paramétrique d'un tige métallique

a	max epsilon	min epsilon
4,50E-07	0,9997375	-3,6308892
r(nm)	omega(hz)	epsilon
1,00E-09	4E+14	0,9992066
1,00E-09	4,05E+14	0,9992258
1,00E-09	4,1E+14	0,9992443
1,00E-09	4,15E+14	0,9992621
1,00E-09	4,2E+14	0,9992793
1,00E-09	4,25E+14	0,9992959
1,00E-09	4,3E+14	0,999312
1,00E-09	4,35E+14	0,9993275
1,00E-09	4,4E+14	0,9993425
1,00E-09	4,45E+14	0,999357
1,00E-09	4,5E+14	0,999371
1,00E-09	4,55E+14	0,9993845
1,00E-09	4,6E+14	0,9993977
1,00E-09	4,65E+14	0,9994104
1,00E-09	4,7E+14	0,9994227
1,00E-09	4,75E+14	0,9994346
1,00E-09	4,8E+14	0,9994462
1,00E-09	4,85E+14	0,9994574
1,00E-09	4,9E+14	0,9994683
1,00E-09	4,95E+14	0,9994788
1,00E-09	5E+14	0,9994891
1,00E-09	5,05E+14	0,999499
1,00E-09	5,1E+14	0,9995087
1,00E-09	5,15E+14	0,9995181
1,00E-09	5,2E+14	0,9995272
1,00E-09	5,25E+14	0,999536
1,00E-09	5,3E+14	0,9995446
1,00E-09	5,35E+14	0,999553
1,00E-09	5,4E+14	0,9995612
1,00E-09	5,45E+14	0,9995691
1,00E-09	5,5E+14	0,9995768
1,00E-09	5,55E+14	0,9995843
1,00E-09	5,6E+14	0,9995916
1,00E-09	5,65E+14	0,9995987
1,00E-09	5,7E+14	0,9996057
1,00E-09	5,75E+14	0,9996124
1,00E-09	5,8E+14	0,999619
1,00E-09	5,85E+14	0,9996254
1,00E-09	5,9E+14	0,9996317
1,00E-09	5,95E+14	0,9996378
1,00E-09	6E+14	0,9996437
1,00E-09	6,05E+14	0,9996495
1,00E-09	6,1E+14	0,9996552
1,00E-09	6,15E+14	0,9996607
1,00E-09	6,2E+14	0,9996661
1,00E-09	6,25E+14	0,9996714
1,00E-09	6,3E+14	0,9996765
1,00E-09	6,35E+14	0,9996815
1,00E-09	6,4E+14	0,9996864
1,00E-09	6,45E+14	0,9996912
1,00E-09	6,5E+14	0,9996959
1,00E-09	6,55E+14	0,9997005
1,00E-09	6,6E+14	0,999705
1,00E-09	6,65E+14	0,9997094
1,00E-09	6,7E+14	0,9997136
1,00E-09	6,75E+14	0,9997178
1,00E-09	6,8E+14	0,9997219
1,00E-09	6,85E+14	0,9997259
1,00E-09	6,9E+14	0,9997299
1,00E-09	6,95E+14	0,9997337
1,00E-09	7E+14	0,9997375

permittivité suivant Drude

r(nm)	omega(hz)	epsilon
2,10E-08	4E+14	0,6606489
2,10E-08	4,05E+14	0,6687302
2,10E-08	4,1E+14	0,6765261
2,10E-08	4,15E+14	0,68405
2,10E-08	4,2E+14	0,6913144
2,10E-08	4,25E+14	0,6983309
2,10E-08	4,3E+14	0,7051109
2,10E-08	4,35E+14	0,7116648
2,10E-08	4,4E+14	0,7180025
2,10E-08	4,45E+14	0,7241335
2,10E-08	4,5E+14	0,7300666
2,10E-08	4,55E+14	0,7358104
2,10E-08	4,6E+14	0,7413727
2,10E-08	4,65E+14	0,7467611
2,10E-08	4,7E+14	0,7519828
2,10E-08	4,75E+14	0,7570447
2,10E-08	4,8E+14	0,7619531
2,10E-08	4,85E+14	0,7667142
2,10E-08	4,9E+14	0,7713338
2,10E-08	4,95E+14	0,7758176
2,10E-08	5E+14	0,7801707
2,10E-08	5,05E+14	0,7843982
2,10E-08	5,1E+14	0,788505
2,10E-08	5,15E+14	0,7924954
2,10E-08	5,2E+14	0,796374
2,10E-08	5,25E+14	0,8001448
2,10E-08	5,3E+14	0,8038118
2,10E-08	5,35E+14	0,8073788
2,10E-08	5,4E+14	0,8108494
2,10E-08	5,45E+14	0,814227
2,10E-08	5,5E+14	0,8175149
2,10E-08	5,55E+14	0,8207163
2,10E-08	5,6E+14	0,8238341
2,10E-08	5,65E+14	0,8268713
2,10E-08	5,7E+14	0,8298306
2,10E-08	5,75E+14	0,8327147
2,10E-08	5,8E+14	0,8355261
2,10E-08	5,85E+14	0,8382671
2,10E-08	5,9E+14	0,8409403
2,10E-08	5,95E+14	0,8435476
2,10E-08	6E+14	0,8460914
2,10E-08	6,05E+14	0,8485736
2,10E-08	6,1E+14	0,8509963
2,10E-08	6,15E+14	0,8533612
2,10E-08	6,2E+14	0,8556703
2,10E-08	6,25E+14	0,8579253
2,10E-08	6,3E+14	0,8601278
2,10E-08	6,35E+14	0,8622795
2,10E-08	6,4E+14	0,8643819
2,10E-08	6,45E+14	0,8664365
2,10E-08	6,5E+14	0,8684448
2,10E-08	6,55E+14	0,8704082
2,10E-08	6,6E+14	0,8723279
2,10E-08	6,65E+14	0,8742052
2,10E-08	6,7E+14	0,8760414
2,10E-08	6,75E+14	0,8778378
2,10E-08	6,8E+14	0,8795953
2,10E-08	6,85E+14	0,8813152
2,10E-08	6,9E+14	0,8829985
2,10E-08	6,95E+14	0,8846462
2,10E-08	7E+14	0,8862594

ANNEXE 1

r(nm)	omega(hz)	epsilon
4,10E-08	4E+14	-0,2557682
4,10E-08	4,05E+14	-0,2262791
4,10E-08	4,1E+14	-0,1978173
4,10E-08	4,15E+14	-0,1703356
4,10E-08	4,2E+14	-0,1437896
4,10E-08	4,25E+14	-0,1181371
4,10E-08	4,3E+14	-0,0933386
4,10E-08	4,35E+14	-0,0693565
4,10E-08	4,4E+14	-0,0461554
4,10E-08	4,45E+14	-0,0237016
4,10E-08	4,5E+14	-0,0019634
4,10E-08	4,55E+14	0,0190893
4,10E-08	4,6E+14	0,039485
4,10E-08	4,65E+14	0,0592508
4,10E-08	4,7E+14	0,0784124
4,10E-08	4,75E+14	0,0969942
4,10E-08	4,8E+14	0,1150193
4,10E-08	4,85E+14	0,1325098
4,10E-08	4,9E+14	0,1494866
4,10E-08	4,95E+14	0,1659697
4,10E-08	5E+14	0,181978
4,10E-08	5,05E+14	0,1975296
4,10E-08	5,1E+14	0,2126417
4,10E-08	5,15E+14	0,2273307
4,10E-08	5,2E+14	0,2416123
4,10E-08	5,25E+14	0,2555014
4,10E-08	5,3E+14	0,2690123
4,10E-08	5,35E+14	0,2821585
4,10E-08	5,4E+14	0,2949531
4,10E-08	5,45E+14	0,3074086
4,10E-08	5,5E+14	0,3195367
4,10E-08	5,55E+14	0,331349
4,10E-08	5,6E+14	0,3428562
4,10E-08	5,65E+14	0,3540688
4,10E-08	5,7E+14	0,3649967
4,10E-08	5,75E+14	0,3756496
4,10E-08	5,8E+14	0,3860365
4,10E-08	5,85E+14	0,3961663
4,10E-08	5,9E+14	0,4060473
4,10E-08	5,95E+14	0,4156877
4,10E-08	6E+14	0,4250952
4,10E-08	6,05E+14	0,4342773
4,10E-08	6,1E+14	0,4432411
4,10E-08	6,15E+14	0,4519934
4,10E-08	6,2E+14	0,4605409
4,10E-08	6,25E+14	0,4688899
4,10E-08	6,3E+14	0,4770465
4,10E-08	6,35E+14	0,4850166
4,10E-08	6,4E+14	0,4928059
4,10E-08	6,45E+14	0,5004197
4,10E-08	6,5E+14	0,5078632
4,10E-08	6,55E+14	0,5151416
4,10E-08	6,6E+14	0,5222597
4,10E-08	6,65E+14	0,5292221
4,10E-08	6,7E+14	0,5360334
4,10E-08	6,75E+14	0,5426979
4,10E-08	6,8E+14	0,5492198
4,10E-08	6,85E+14	0,5556032
4,10E-08	6,9E+14	0,5618518
4,10E-08	6,95E+14	0,5679696

Etude paramétrique d'un tige métallique

a	max epsilon	min epsilon
6,00E-07	0,9998523	-1,6048752
r(nm)	omega(hz)	epsilon
1,00E-09	4E+14	0,9995537
1,00E-09	4,05E+14	0,9995645
1,00E-09	4,1E+14	0,9995749
1,00E-09	4,15E+14	0,9995849
1,00E-09	4,2E+14	0,9995946
1,00E-09	4,25E+14	0,999604
1,00E-09	4,3E+14	0,999613
1,00E-09	4,35E+14	0,9996217
1,00E-09	4,4E+14	0,9996301
1,00E-09	4,45E+14	0,9996383
1,00E-09	4,5E+14	0,9996462
1,00E-09	4,55E+14	0,9996538
1,00E-09	4,6E+14	0,9996612
1,00E-09	4,65E+14	0,9996683
1,00E-09	4,7E+14	0,9996753
1,00E-09	4,75E+14	0,999682
1,00E-09	4,8E+14	0,9996885
1,00E-09	4,85E+14	0,9996948
1,00E-09	4,9E+14	0,9997009
1,00E-09	4,95E+14	0,9997068
1,00E-09	5E+14	0,9997126
1,00E-09	5,05E+14	0,9997182
1,00E-09	5,1E+14	0,9997236
1,00E-09	5,15E+14	0,9997289
1,00E-09	5,2E+14	0,999734
1,00E-09	5,25E+14	0,999739
1,00E-09	5,3E+14	0,9997439
1,00E-09	5,35E+14	0,9997486
1,00E-09	5,4E+14	0,9997532
1,00E-09	5,45E+14	0,9997576
1,00E-09	5,5E+14	0,9997619
1,00E-09	5,55E+14	0,9997662
1,00E-09	5,6E+14	0,9997703
1,00E-09	5,65E+14	0,9997743
1,00E-09	5,7E+14	0,9997782
1,00E-09	5,75E+14	0,999782
1,00E-09	5,8E+14	0,9997857
1,00E-09	5,85E+14	0,9997893
1,00E-09	5,9E+14	0,9997928
1,00E-09	5,95E+14	0,9997962
1,00E-09	6E+14	0,9997996
1,00E-09	6,05E+14	0,9998029
1,00E-09	6,1E+14	0,999806
1,00E-09	6,15E+14	0,9998091
1,00E-09	6,2E+14	0,9998122
1,00E-09	6,25E+14	0,9998151
1,00E-09	6,3E+14	0,999818
1,00E-09	6,35E+14	0,9998209
1,00E-09	6,4E+14	0,9998236
1,00E-09	6,45E+14	0,9998263
1,00E-09	6,5E+14	0,999829
1,00E-09	6,55E+14	0,9998315
1,00E-09	6,6E+14	0,9998341
1,00E-09	6,65E+14	0,9998365
1,00E-09	6,7E+14	0,9998389
1,00E-09	6,75E+14	0,9998413
1,00E-09	6,8E+14	0,9998436
1,00E-09	6,85E+14	0,9998458
1,00E-09	6,9E+14	0,999848
1,00E-09	6,95E+14	0,9998502
1,00E-09	7E+14	0,9998523

permittivité suivant Drude

r(nm)	omega(hz)	epsilon
2,10E-08	4E+14	0,809115
2,10E-08	4,05E+14	0,8136607
2,10E-08	4,1E+14	0,818046
2,10E-08	4,15E+14	0,8222781
2,10E-08	4,2E+14	0,8263643
2,10E-08	4,25E+14	0,8303111
2,10E-08	4,3E+14	0,8341249
2,10E-08	4,35E+14	0,8378114
2,10E-08	4,4E+14	0,8413764
2,10E-08	4,45E+14	0,8448251
2,10E-08	4,5E+14	0,8481625
2,10E-08	4,55E+14	0,8513933
2,10E-08	4,6E+14	0,8545221
2,10E-08	4,65E+14	0,8575531
2,10E-08	4,7E+14	0,8604903
2,10E-08	4,75E+14	0,8633376
2,10E-08	4,8E+14	0,8660986
2,10E-08	4,85E+14	0,8687767
2,10E-08	4,9E+14	0,8713753
2,10E-08	4,95E+14	0,8738974
2,10E-08	5E+14	0,876346
2,10E-08	5,05E+14	0,878724
2,10E-08	5,1E+14	0,881034
2,10E-08	5,15E+14	0,8832787
2,10E-08	5,2E+14	0,8854604
2,10E-08	5,25E+14	0,8875815
2,10E-08	5,3E+14	0,8896442
2,10E-08	5,35E+14	0,8916506
2,10E-08	5,4E+14	0,8936028
2,10E-08	5,45E+14	0,8955027
2,10E-08	5,5E+14	0,8973521
2,10E-08	5,55E+14	0,8991529
2,10E-08	5,6E+14	0,9009067
2,10E-08	5,65E+14	0,9026151
2,10E-08	5,7E+14	0,9042797
2,10E-08	5,75E+14	0,905902
2,10E-08	5,8E+14	0,9074834
2,10E-08	5,85E+14	0,9090253
2,10E-08	5,9E+14	0,9105289
2,10E-08	5,95E+14	0,9119955
2,10E-08	6E+14	0,9134264
2,10E-08	6,05E+14	0,9148227
2,10E-08	6,1E+14	0,9161854
2,10E-08	6,15E+14	0,9175157
2,10E-08	6,2E+14	0,9188145
2,10E-08	6,25E+14	0,920083
2,10E-08	6,3E+14	0,9213219
2,10E-08	6,35E+14	0,9225322
2,10E-08	6,4E+14	0,9237148
2,10E-08	6,45E+14	0,9248706
2,10E-08	6,5E+14	0,9260002
2,10E-08	6,55E+14	0,9271046
2,10E-08	6,6E+14	0,9281844
2,10E-08	6,65E+14	0,9292404
2,10E-08	6,7E+14	0,9302733
2,10E-08	6,75E+14	0,9312837
2,10E-08	6,8E+14	0,9322724
2,10E-08	6,85E+14	0,9332398
2,10E-08	6,9E+14	0,9341866
2,10E-08	6,95E+14	0,9351135
2,10E-08	7E+14	0,9360209

ANNEXE 1

r(nm)	omega(hz)	epsilon
4,10E-08	4E+14	0,2936304
4,10E-08	4,05E+14	0,310218
4,10E-08	4,1E+14	0,3262278
4,10E-08	4,15E+14	0,3416862
4,10E-08	4,2E+14	0,3566184
4,10E-08	4,25E+14	0,3710479
4,10E-08	4,3E+14	0,384997
4,10E-08	4,35E+14	0,398487
4,10E-08	4,4E+14	0,4115376
4,10E-08	4,45E+14	0,4241679
4,10E-08	4,5E+14	0,4363956
4,10E-08	4,55E+14	0,4482377
4,10E-08	4,6E+14	0,4597103
4,10E-08	4,65E+14	0,4708286
4,10E-08	4,7E+14	0,481607
4,10E-08	4,75E+14	0,4920592
4,10E-08	4,8E+14	0,5021984
4,10E-08	4,85E+14	0,5120368
4,10E-08	4,9E+14	0,5215862
4,10E-08	4,95E+14	0,530858
4,10E-08	5E+14	0,5398626
4,10E-08	5,05E+14	0,5486104
4,10E-08	5,1E+14	0,557111
4,10E-08	5,15E+14	0,5653735
4,10E-08	5,2E+14	0,5734069
4,10E-08	5,25E+14	0,5812195
4,10E-08	5,3E+14	0,5888194
4,10E-08	5,35E+14	0,5962142
4,10E-08	5,4E+14	0,6034111
4,10E-08	5,45E+14	0,6104173
4,10E-08	5,5E+14	0,6172394
4,10E-08	5,55E+14	0,6238838
4,10E-08	5,6E+14	0,6303566
4,10E-08	5,65E+14	0,6366637
4,10E-08	5,7E+14	0,6428107
4,10E-08	5,75E+14	0,6488029
4,10E-08	5,8E+14	0,6546455
4,10E-08	5,85E+14	0,6603435
4,10E-08	5,9E+14	0,6659016
4,10E-08	5,95E+14	0,6713243
4,10E-08	6E+14	0,6766161
4,10E-08	6,05E+14	0,681781
4,10E-08	6,1E+14	0,6868231
4,10E-08	6,15E+14	0,6917463
4,10E-08	6,2E+14	0,6965543
4,10E-08	6,25E+14	0,7012506
4,10E-08	6,3E+14	0,7058387
4,10E-08	6,35E+14	0,7103219
4,10E-08	6,4E+14	0,7147033
4,10E-08	6,45E+14	0,7189861
4,10E-08	6,5E+14	0,7231731
4,10E-08	6,55E+14	0,7272672
4,10E-08	6,6E+14	0,7312711
4,10E-08	6,65E+14	0,7351875
4,10E-08	6,7E+14	0,7390188
4,10E-08	6,75E+14	0,7427676
4,10E-08	6,8E+14	0,7464362
4,10E-08	6,85E+14	0,7500268
4,10E-08	6,9E+14	0,7535417
4,10E-08	6,95E+14	0,7569829

Etude paramétrique d'un tige métallique

a	max epsilon	min epsilon
7,50E-07	0,9999055	-0,6671201
r(nm)	omega(hz)	epsilon
1,00E-09	4E+14	0,9997144
1,00E-09	4,05E+14	0,9997213
1,00E-09	4,1E+14	0,9997279
1,00E-09	4,15E+14	0,9997344
1,00E-09	4,2E+14	0,9997406
1,00E-09	4,25E+14	0,9997465
1,00E-09	4,3E+14	0,9997523
1,00E-09	4,35E+14	0,9997579
1,00E-09	4,4E+14	0,9997633
1,00E-09	4,45E+14	0,9997685
1,00E-09	4,5E+14	0,9997736
1,00E-09	4,55E+14	0,9997784
1,00E-09	4,6E+14	0,9997832
1,00E-09	4,65E+14	0,9997877
1,00E-09	4,7E+14	0,9997922
1,00E-09	4,75E+14	0,9997965
1,00E-09	4,8E+14	0,9998006
1,00E-09	4,85E+14	0,9998047
1,00E-09	4,9E+14	0,9998086
1,00E-09	4,95E+14	0,9998124
1,00E-09	5E+14	0,9998161
1,00E-09	5,05E+14	0,9998196
1,00E-09	5,1E+14	0,9998231
1,00E-09	5,15E+14	0,9998265
1,00E-09	5,2E+14	0,9998298
1,00E-09	5,25E+14	0,9998333
1,00E-09	5,3E+14	0,9998361
1,00E-09	5,35E+14	0,9998391
1,00E-09	5,4E+14	0,999842
1,00E-09	5,45E+14	0,9998449
1,00E-09	5,5E+14	0,9998476
1,00E-09	5,55E+14	0,9998503
1,00E-09	5,6E+14	0,999853
1,00E-09	5,65E+14	0,9998555
1,00E-09	5,7E+14	0,999858
1,00E-09	5,75E+14	0,9998605
1,00E-09	5,8E+14	0,9998628
1,00E-09	5,85E+14	0,9998651
1,00E-09	5,9E+14	0,9998674
1,00E-09	5,95E+14	0,9998696
1,00E-09	6E+14	0,9998717
1,00E-09	6,05E+14	0,9998738
1,00E-09	6,1E+14	0,9998759
1,00E-09	6,15E+14	0,9998779
1,00E-09	6,2E+14	0,9998798
1,00E-09	6,25E+14	0,9998817
1,00E-09	6,3E+14	0,9998835
1,00E-09	6,35E+14	0,9998854
1,00E-09	6,4E+14	0,9998871
1,00E-09	6,45E+14	0,9998888
1,00E-09	6,5E+14	0,9998905
1,00E-09	6,55E+14	0,9998922
1,00E-09	6,6E+14	0,9998938
1,00E-09	6,65E+14	0,9998954
1,00E-09	6,7E+14	0,9998969
1,00E-09	6,75E+14	0,9998984
1,00E-09	6,8E+14	0,9998999
1,00E-09	6,85E+14	0,9999013
1,00E-09	6,9E+14	0,9999027
1,00E-09	6,95E+14	0,9999041
1,00E-09	7E+14	0,9999055

permittivité suivant Drude

r(nm)	omega(hz)	epsilon
2,10E-08	4E+14	0,8778336
2,10E-08	4,05E+14	0,8807429
2,10E-08	4,1E+14	0,8835494
2,10E-08	4,15E+14	0,886258
2,10E-08	4,2E+14	0,8888732
2,10E-08	4,25E+14	0,8913991
2,10E-08	4,3E+14	0,8938399
2,10E-08	4,35E+14	0,8961993
2,10E-08	4,4E+14	0,8984809
2,10E-08	4,45E+14	0,9006881
2,10E-08	4,5E+14	0,902824
2,10E-08	4,55E+14	0,9048917
2,10E-08	4,6E+14	0,9068942
2,10E-08	4,65E+14	0,908834
2,10E-08	4,7E+14	0,9107138
2,10E-08	4,75E+14	0,9125361
2,10E-08	4,8E+14	0,9143031
2,10E-08	4,85E+14	0,9160171
2,10E-08	4,9E+14	0,9176802
2,10E-08	4,95E+14	0,9192943
2,10E-08	5E+14	0,9208615
2,10E-08	5,05E+14	0,9223834
2,10E-08	5,1E+14	0,9238618
2,10E-08	5,15E+14	0,9252984
2,10E-08	5,2E+14	0,9266946
2,10E-08	5,25E+14	0,9280521
2,10E-08	5,3E+14	0,9293723
2,10E-08	5,35E+14	0,9306564
2,10E-08	5,4E+14	0,9319058
2,10E-08	5,45E+14	0,9331217
2,10E-08	5,5E+14	0,9343054
2,10E-08	5,55E+14	0,9354579
2,10E-08	5,6E+14	0,9365803
2,10E-08	5,65E+14	0,9376737
2,10E-08	5,7E+14	0,938739
2,10E-08	5,75E+14	0,9397773
2,10E-08	5,8E+14	0,9407894
2,10E-08	5,85E+14	0,9417762
2,10E-08	5,9E+14	0,9427385
2,10E-08	5,95E+14	0,9436771
2,10E-08	6E+14	0,9445929
2,10E-08	6,05E+14	0,9454865
2,10E-08	6,1E+14	0,9463587
2,10E-08	6,15E+14	0,94721
2,10E-08	6,2E+14	0,9480413
2,10E-08	6,25E+14	0,9488531
2,10E-08	6,3E+14	0,949646
2,10E-08	6,35E+14	0,9504206
2,10E-08	6,4E+14	0,9511775
2,10E-08	6,45E+14	0,9519172
2,10E-08	6,5E+14	0,9526401
2,10E-08	6,55E+14	0,9533469
2,10E-08	6,6E+14	0,954038
2,10E-08	6,65E+14	0,9547139
2,10E-08	6,7E+14	0,9553749
2,10E-08	6,75E+14	0,9560216
2,10E-08	6,8E+14	0,9566543
2,10E-08	6,85E+14	0,9572735
2,10E-08	6,9E+14	0,9578795
2,10E-08	6,95E+14	0,9584726
2,10E-08	7E+14	0,9590534

ANNEXE 1

r(nm)	omega(hz)	epsilon
4,10E-08	4E+14	0,5479234
4,10E-08	4,05E+14	0,5585395
4,10E-08	4,1E+14	0,5687858
4,10E-08	4,15E+14	0,5786792
4,10E-08	4,2E+14	0,5882358
4,10E-08	4,25E+14	0,5974706
4,10E-08	4,3E+14	0,6063981
4,10E-08	4,35E+14	0,6150317
4,10E-08	4,4E+14	0,6233841
4,10E-08	4,45E+14	0,6314674
4,10E-08	4,5E+14	0,6392932
4,10E-08	4,55E+14	0,6468721
4,10E-08	4,6E+14	0,6542146
4,10E-08	4,65E+14	0,6613303
4,10E-08	4,7E+14	0,6682285
4,10E-08	4,75E+14	0,6749179
4,10E-08	4,8E+14	0,6814069
4,10E-08	4,85E+14	0,6877035
4,10E-08	4,9E+14	0,6938152
4,10E-08	4,95E+14	0,6997491
4,10E-08	5E+14	0,7055121
4,10E-08	5,05E+14	0,7111107
4,10E-08	5,1E+14	0,716551
4,10E-08	5,15E+14	0,7218391
4,10E-08	5,2E+14	0,7269804
4,10E-08	5,25E+14	0,7319805
4,10E-08	5,3E+14	0,7368444
4,10E-08	5,35E+14	0,7415771
4,10E-08	5,4E+14	0,7461831
4,10E-08	5,45E+14	0,7506671
4,10E-08	5,5E+14	0,7550332
4,10E-08	5,55E+14	0,7592856
4,10E-08	5,6E+14	0,7634282
4,10E-08	5,65E+14	0,7674648
4,10E-08	5,7E+14	0,7713988
4,10E-08	5,75E+14	0,7752338
4,10E-08	5,8E+14	0,7789731
4,10E-08	5,85E+14	0,7826199
4,10E-08	5,9E+14	0,786177
4,10E-08	5,95E+14	0,7896476
4,10E-08	6E+14	0,7930343
4,10E-08	6,05E+14	0,7963398
4,10E-08	6,1E+14	0,7995668
4,10E-08	6,15E+14	0,8027176
4,10E-08	6,2E+14	0,8057947
4,10E-08	6,25E+14	0,8088004
4,10E-08	6,3E+14	0,8117368
4,10E-08	6,35E+14	0,814606
4,10E-08	6,4E+14	0,8174101
4,10E-08	6,45E+14	0,8201511
4,10E-08	6,5E+14	0,8228308
4,10E-08	6,55E+14	0,825451
4,10E-08	6,6E+14	0,8280135
4,10E-08	6,65E+14	0,83052
4,10E-08	6,7E+14	0,832972
4,10E-08	6,75E+14	0,8353713
4,10E-08	6,8E+14	0,8377191
4,10E-08	6,85E+14	0,8400171
4,10E-08	6,9E+14	0,8422667
4,10E-08	6,95E+14	0,8444691

Etude paramétrique d'un tige métallique

a	max epsilon	min epsilon
9,00E-07	0,9999344	-0,1577223
r(nm)	omega(hz)	epsilon
1,00E-09	4E+14	0,9998017
1,00E-09	4,05E+14	0,9998065
1,00E-09	4,1E+14	0,9998111
1,00E-09	4,15E+14	0,9998155
1,00E-09	4,2E+14	0,9998198
1,00E-09	4,25E+14	0,999824
1,00E-09	4,3E+14	0,999828
1,00E-09	4,35E+14	0,9998319
1,00E-09	4,4E+14	0,9998356
1,00E-09	4,45E+14	0,9998392
1,00E-09	4,5E+14	0,9998427
1,00E-09	4,55E+14	0,9998461
1,00E-09	4,6E+14	0,9998494
1,00E-09	4,65E+14	0,9998526
1,00E-09	4,7E+14	0,9998557
1,00E-09	4,75E+14	0,9998587
1,00E-09	4,8E+14	0,9998615
1,00E-09	4,85E+14	0,9998644
1,00E-09	4,9E+14	0,9998671
1,00E-09	4,95E+14	0,9998697
1,00E-09	5E+14	0,9998723
1,00E-09	5,05E+14	0,9998748
1,00E-09	5,1E+14	0,9998772
1,00E-09	5,15E+14	0,9998795
1,00E-09	5,2E+14	0,9998818
1,00E-09	5,25E+14	0,999884
1,00E-09	5,3E+14	0,9998862
1,00E-09	5,35E+14	0,9998883
1,00E-09	5,4E+14	0,9998903
1,00E-09	5,45E+14	0,9998923
1,00E-09	5,5E+14	0,9998942
1,00E-09	5,55E+14	0,9998961
1,00E-09	5,6E+14	0,9998979
1,00E-09	5,65E+14	0,9998997
1,00E-09	5,7E+14	0,9999014
1,00E-09	5,75E+14	0,9999031
1,00E-09	5,8E+14	0,9999047
1,00E-09	5,85E+14	0,9999064
1,00E-09	5,9E+14	0,9999079
1,00E-09	5,95E+14	0,9999094
1,00E-09	6E+14	0,9999109
1,00E-09	6,05E+14	0,9999124
1,00E-09	6,1E+14	0,9999138
1,00E-09	6,15E+14	0,9999152
1,00E-09	6,2E+14	0,9999165
1,00E-09	6,25E+14	0,9999178
1,00E-09	6,3E+14	0,9999191
1,00E-09	6,35E+14	0,9999204
1,00E-09	6,4E+14	0,9999216
1,00E-09	6,45E+14	0,9999228
1,00E-09	6,5E+14	0,999924
1,00E-09	6,55E+14	0,9999251
1,00E-09	6,6E+14	0,9999262
1,00E-09	6,65E+14	0,9999273
1,00E-09	6,7E+14	0,9999284
1,00E-09	6,75E+14	0,9999295
1,00E-09	6,8E+14	0,9999305
1,00E-09	6,85E+14	0,9999315
1,00E-09	6,9E+14	0,9999325
1,00E-09	6,95E+14	0,9999334
1,00E-09	7E+14	0,9999344

permittivité suivant Drude

r(nm)	omega(hz)	epsilon
2,10E-08	4E+14	0,9151622
2,10E-08	4,05E+14	0,9171825
2,10E-08	4,1E+14	0,9191315
2,10E-08	4,15E+14	0,9210125
2,10E-08	4,2E+14	0,9228286
2,10E-08	4,25E+14	0,9245827
2,10E-08	4,3E+14	0,9262777
2,10E-08	4,35E+14	0,9279162
2,10E-08	4,4E+14	0,9295006
2,10E-08	4,45E+14	0,9310334
2,10E-08	4,5E+14	0,9325167
2,10E-08	4,55E+14	0,9339526
2,10E-08	4,6E+14	0,9353432
2,10E-08	4,65E+14	0,9366903
2,10E-08	4,7E+14	0,9379957
2,10E-08	4,75E+14	0,9392612
2,10E-08	4,8E+14	0,9404883
2,10E-08	4,85E+14	0,9416785
2,10E-08	4,9E+14	0,9428335
2,10E-08	4,95E+14	0,9439544
2,10E-08	5E+14	0,9450427
2,10E-08	5,05E+14	0,9460996
2,10E-08	5,1E+14	0,9471262
2,10E-08	5,15E+14	0,9481239
2,10E-08	5,2E+14	0,9490935
2,10E-08	5,25E+14	0,9500362
2,10E-08	5,3E+14	0,950953
2,10E-08	5,35E+14	0,9518447
2,10E-08	5,4E+14	0,9527123
2,10E-08	5,45E+14	0,9535567
2,10E-08	5,5E+14	0,9543787
2,10E-08	5,55E+14	0,9551791
2,10E-08	5,6E+14	0,9559585
2,10E-08	5,65E+14	0,9567178
2,10E-08	5,7E+14	0,9574577
2,10E-08	5,75E+14	0,9581787
2,10E-08	5,8E+14	0,9588815
2,10E-08	5,85E+14	0,9595668
2,10E-08	5,9E+14	0,9602351
2,10E-08	5,95E+14	0,9608869
2,10E-08	6E+14	0,9615228
2,10E-08	6,05E+14	0,9621434
2,10E-08	6,1E+14	0,9627491
2,10E-08	6,15E+14	0,9633403
2,10E-08	6,2E+14	0,9639176
2,10E-08	6,25E+14	0,9644813
2,10E-08	6,3E+14	0,9650319
2,10E-08	6,35E+14	0,9655699
2,10E-08	6,4E+14	0,9660955
2,10E-08	6,45E+14	0,9666091
2,10E-08	6,5E+14	0,9671112
2,10E-08	6,55E+14	0,967602
2,10E-08	6,6E+14	0,968082
2,10E-08	6,65E+14	0,9685513
2,10E-08	6,7E+14	0,9690104
2,10E-08	6,75E+14	0,9694594
2,10E-08	6,8E+14	0,9698988
2,10E-08	6,85E+14	0,9703288
2,10E-08	6,9E+14	0,9707496
2,10E-08	6,95E+14	0,9711616
2,10E-08	7E+14	0,9715648

ANNEXE 1

r(nm)	omega(hz)	epsilon
4,10E-08	4E+14	0,6860579
4,10E-08	4,05E+14	0,6934302
4,10E-08	4,1E+14	0,7005457
4,10E-08	4,15E+14	0,7074161
4,10E-08	4,2E+14	0,7140526
4,10E-08	4,25E+14	0,7204657
4,10E-08	4,3E+14	0,7266653
4,10E-08	4,35E+14	0,7326609
4,10E-08	4,4E+14	0,7384612
4,10E-08	4,45E+14	0,7440746
4,10E-08	4,5E+14	0,7495091
4,10E-08	4,55E+14	0,7547723
4,10E-08	4,6E+14	0,7598712
4,10E-08	4,65E+14	0,7648127
4,10E-08	4,7E+14	0,7696031
4,10E-08	4,75E+14	0,7742485
4,10E-08	4,8E+14	0,7787548
4,10E-08	4,85E+14	0,7831275
4,10E-08	4,9E+14	0,7873717
4,10E-08	4,95E+14	0,7914924
4,10E-08	5E+14	0,7954945
4,10E-08	5,05E+14	0,7993824
4,10E-08	5,1E+14	0,8031604
4,10E-08	5,15E+14	0,8068327
4,10E-08	5,2E+14	0,8104031
4,10E-08	5,25E+14	0,8138753
4,10E-08	5,3E+14	0,8172531
4,10E-08	5,35E+14	0,8205396
4,10E-08	5,4E+14	0,8237383
4,10E-08	5,45E+14	0,8268521
4,10E-08	5,5E+14	0,8298842
4,10E-08	5,55E+14	0,8328372
4,10E-08	5,6E+14	0,835714
4,10E-08	5,65E+14	0,8385172
4,10E-08	5,7E+14	0,8412492
4,10E-08	5,75E+14	0,8439124
4,10E-08	5,8E+14	0,8465091
4,10E-08	5,85E+14	0,8490416
4,10E-08	5,9E+14	0,8515118
4,10E-08	5,95E+14	0,8539219
4,10E-08	6E+14	0,8562738
4,10E-08	6,05E+14	0,8585693
4,10E-08	6,1E+14	0,8608103
4,10E-08	6,15E+14	0,8629984
4,10E-08	6,2E+14	0,8651352
4,10E-08	6,25E+14	0,8672225
4,10E-08	6,3E+14	0,8692616
4,10E-08	6,35E+14	0,8712542
4,10E-08	6,4E+14	0,8732015
4,10E-08	6,45E+14	0,8751049
4,10E-08	6,5E+14	0,8769658
4,10E-08	6,55E+14	0,8787854
4,10E-08	6,6E+14	0,8805649
4,10E-08	6,65E+14	0,8823055
4,10E-08	6,7E+14	0,8840084
4,10E-08	6,75E+14	0,8856745
4,10E-08	6,8E+14	0,887305
4,10E-08	6,85E+14	0,8889008
4,10E-08	6,9E+14	0,890463
4,10E-08	6,95E+14	0,8919924

Etude paramétrique d'un tige métallique

a	max epsilon	min epsilon
1,50E-07	0,9039675	-4,8392166
r(nm)	omega(hz)	epsilon
1,00E-09	4E+14	0,8099345
1,00E-09	4,05E+14	0,8126898
1,00E-09	4,1E+14	0,8153762
1,00E-09	4,15E+14	0,8179961
1,00E-09	4,2E+14	0,8205519
1,00E-09	4,25E+14	0,823046
1,00E-09	4,3E+14	0,8254804
1,00E-09	4,35E+14	0,8278572
1,00E-09	4,4E+14	0,8301785
1,00E-09	4,45E+14	0,832446
1,00E-09	4,5E+14	0,8346617
1,00E-09	4,55E+14	0,8368271
1,00E-09	4,6E+14	0,838944
1,00E-09	4,65E+14	0,8410139
1,00E-09	4,7E+14	0,8430384
1,00E-09	4,75E+14	0,8450189
1,00E-09	4,8E+14	0,8469567
1,00E-09	4,85E+14	0,8488533
1,00E-09	4,9E+14	0,8507098
1,00E-09	4,95E+14	0,8525275
1,00E-09	5E+14	0,8543075
1,00E-09	5,05E+14	0,8560511
1,00E-09	5,1E+14	0,8577592
1,00E-09	5,15E+14	0,8594329
1,00E-09	5,2E+14	0,8610733
1,00E-09	5,25E+14	0,8626812
1,00E-09	5,3E+14	0,8642576
1,00E-09	5,35E+14	0,8658034
1,00E-09	5,4E+14	0,8673194
1,00E-09	5,45E+14	0,8688065
1,00E-09	5,5E+14	0,8702655
1,00E-09	5,55E+14	0,8716971
1,00E-09	5,6E+14	0,8731021
1,00E-09	5,65E+14	0,8744812
1,00E-09	5,7E+14	0,875835
1,00E-09	5,75E+14	0,8771643
1,00E-09	5,8E+14	0,8784696
1,00E-09	5,85E+14	0,8797517
1,00E-09	5,9E+14	0,8810111
1,00E-09	5,95E+14	0,8822483
1,00E-09	6E+14	0,883464
1,00E-09	6,05E+14	0,8846586
1,00E-09	6,1E+14	0,8858327
1,00E-09	6,15E+14	0,8869869
1,00E-09	6,2E+14	0,8881215
1,00E-09	6,25E+14	0,8892371
1,00E-09	6,3E+14	0,8903341
1,00E-09	6,35E+14	0,891413
1,00E-09	6,4E+14	0,8924742
1,00E-09	6,45E+14	0,8935181
1,00E-09	6,5E+14	0,8945452
1,00E-09	6,55E+14	0,8955557
1,00E-09	6,6E+14	0,8965501
1,00E-09	6,65E+14	0,8975288
1,00E-09	6,7E+14	0,8984921
1,00E-09	6,75E+14	0,8994403
1,00E-09	6,8E+14	0,9003739
1,00E-09	6,85E+14	0,9012931
1,00E-09	6,9E+14	0,9021982
1,00E-09	6,95E+14	0,9030895
1,00E-09	7E+14	0,9039675

permittivité suivant Maslovski

r(nm)	omega(hz)	epsilon
2,10E-08	4E+14	-3,8886576
2,10E-08	4,05E+14	-3,7743702
2,10E-08	4,1E+14	-3,6640473
2,10E-08	4,15E+14	-3,5575075
2,10E-08	4,2E+14	-3,4545798
2,10E-08	4,25E+14	-3,3551025
2,10E-08	4,3E+14	-3,258923
2,10E-08	4,35E+14	-3,165897
2,10E-08	4,4E+14	-3,0758881
2,10E-08	4,45E+14	-2,9887671
2,10E-08	4,5E+14	-2,9044116
2,10E-08	4,55E+14	-2,8227059
2,10E-08	4,6E+14	-2,7435399
2,10E-08	4,65E+14	-2,6668094
2,10E-08	4,7E+14	-2,5924156
2,10E-08	4,75E+14	-2,5202644
2,10E-08	4,8E+14	-2,4502664
2,10E-08	4,85E+14	-2,3823369
2,10E-08	4,9E+14	-2,3163951
2,10E-08	4,95E+14	-2,2523641
2,10E-08	5E+14	-2,1901708
2,10E-08	5,05E+14	-2,1297455
2,10E-08	5,1E+14	-2,0710218
2,10E-08	5,15E+14	-2,0139363
2,10E-08	5,2E+14	-1,9584286
2,10E-08	5,25E+14	-1,9044411
2,10E-08	5,3E+14	-1,8519188
2,10E-08	5,35E+14	-1,800809
2,10E-08	5,4E+14	-1,7510616
2,10E-08	5,45E+14	-1,7026286
2,10E-08	5,5E+14	-1,6554639
2,10E-08	5,55E+14	-1,6095238
2,10E-08	5,6E+14	-1,5647662
2,10E-08	5,65E+14	-1,5211507
2,10E-08	5,7E+14	-1,4786389
2,10E-08	5,75E+14	-1,4371938
2,10E-08	5,8E+14	-1,39678
2,10E-08	5,85E+14	-1,3573635
2,10E-08	5,9E+14	-1,3189119
2,10E-08	5,95E+14	-1,2813937
2,10E-08	6E+14	-1,2447792
2,10E-08	6,05E+14	-1,2090394
2,10E-08	6,1E+14	-1,1741467
2,10E-08	6,15E+14	-1,1400746
2,10E-08	6,2E+14	-1,1067975
2,10E-08	6,25E+14	-1,0742908
2,10E-08	6,3E+14	-1,0425309
2,10E-08	6,35E+14	-1,0114952
2,10E-08	6,4E+14	-0,9811618
2,10E-08	6,45E+14	-0,9515095
2,10E-08	6,5E+14	-0,9225183
2,10E-08	6,55E+14	-0,8941686
2,10E-08	6,6E+14	-0,8664415
2,10E-08	6,65E+14	-0,839319
2,10E-08	6,7E+14	-0,8127836
2,10E-08	6,75E+14	-0,7868186
2,10E-08	6,8E+14	-0,7614075
2,10E-08	6,85E+14	-0,7365349
2,10E-08	6,9E+14	-0,7121856
2,10E-08	6,95E+14	-0,688345
2,10E-08	7E+14	-0,664999

ANNEXE 2

r(nm)	omega(hz)	epsilon
4,10E-08	6,6E+14	-4,8392166
4,10E-08	6,65E+14	-4,75497
4,10E-08	6,7E+14	-4,6725344
4,10E-08	6,75E+14	-4,5918582
4,10E-08	6,8E+14	-4,5128918
4,10E-08	6,85E+14	-4,4355872
4,10E-08	6,9E+14	-4,3598979
4,10E-08	6,95E+14	-4,2857794
4,10E-08	7E+14	-4,2131884

Etude paramétrique d'un tige métallique

a	max epsilon	min epsilon
3,00E-07	0,977164	-2,939315
r(nm)	omega(hz)	epsilon
1,00E-09	4E+14	0,954009
1,00E-09	4,05E+14	0,954691
1,00E-09	4,1E+14	0,955355
1,00E-09	4,15E+14	0,956003
1,00E-09	4,2E+14	0,956635
1,00E-09	4,25E+14	0,957252
1,00E-09	4,3E+14	0,957854
1,00E-09	4,35E+14	0,958441
1,00E-09	4,4E+14	0,959014
1,00E-09	4,45E+14	0,959575
1,00E-09	4,5E+14	0,960122
1,00E-09	4,55E+14	0,960656
1,00E-09	4,6E+14	0,961179
1,00E-09	4,65E+14	0,96169
1,00E-09	4,7E+14	0,96219
1,00E-09	4,75E+14	0,962678
1,00E-09	4,8E+14	0,963156
1,00E-09	4,85E+14	0,963624
1,00E-09	4,9E+14	0,964082
1,00E-09	4,95E+14	0,96453
1,00E-09	5E+14	0,964969
1,00E-09	5,05E+14	0,965398
1,00E-09	5,1E+14	0,965819
1,00E-09	5,15E+14	0,966231
1,00E-09	5,2E+14	0,966635
1,00E-09	5,25E+14	0,967031
1,00E-09	5,3E+14	0,967419
1,00E-09	5,35E+14	0,9678
1,00E-09	5,4E+14	0,968173
1,00E-09	5,45E+14	0,968539
1,00E-09	5,5E+14	0,968898
1,00E-09	5,55E+14	0,96925
1,00E-09	5,6E+14	0,969595
1,00E-09	5,65E+14	0,969934
1,00E-09	5,7E+14	0,970267
1,00E-09	5,75E+14	0,970594
1,00E-09	5,8E+14	0,970914
1,00E-09	5,85E+14	0,971229
1,00E-09	5,9E+14	0,971539
1,00E-09	5,95E+14	0,971842
1,00E-09	6E+14	0,972141
1,00E-09	6,05E+14	0,972434
1,00E-09	6,1E+14	0,972722
1,00E-09	6,15E+14	0,973005
1,00E-09	6,2E+14	0,973284
1,00E-09	6,25E+14	0,973557
1,00E-09	6,3E+14	0,973826
1,00E-09	6,35E+14	0,974091
1,00E-09	6,4E+14	0,974351
1,00E-09	6,45E+14	0,974607
1,00E-09	6,5E+14	0,974858
1,00E-09	6,55E+14	0,975106
1,00E-09	6,6E+14	0,975349
1,00E-09	6,65E+14	0,975589
1,00E-09	6,7E+14	0,975825
1,00E-09	6,75E+14	0,976057
1,00E-09	6,8E+14	0,976285
1,00E-09	6,85E+14	0,97651
1,00E-09	6,9E+14	0,976731
1,00E-09	6,95E+14	0,9769494
1,00E-09	7E+14	0,977164

permittivité suivant Maslovski

r(nm)	omega(hz)	epsilon
2,10E-08	4E+14	0,3058073
2,10E-08	4,05E+14	0,3223845
2,10E-08	4,1E+14	0,3383749
2,10E-08	4,15E+14	0,3538057
2,10E-08	4,2E+14	0,3687027
2,10E-08	4,25E+14	0,3830904
2,10E-08	4,3E+14	0,3969917
2,10E-08	4,35E+14	0,4104282
2,10E-08	4,4E+14	0,4234205
2,10E-08	4,45E+14	0,4359879
2,10E-08	4,5E+14	0,4481488
2,10E-08	4,55E+14	0,4599205
2,10E-08	4,6E+14	0,4713194
2,10E-08	4,65E+14	0,4823612
2,10E-08	4,7E+14	0,4930605
2,10E-08	4,75E+14	0,5034315
2,10E-08	4,8E+14	0,5134874
2,10E-08	4,85E+14	0,5232408
2,10E-08	4,9E+14	0,5327038
2,10E-08	4,95E+14	0,5418878
2,10E-08	5E+14	0,5508036
2,10E-08	5,05E+14	0,5594616
2,10E-08	5,1E+14	0,5678716
2,10E-08	5,15E+14	0,5760431
2,10E-08	5,2E+14	0,5839849
2,10E-08	5,25E+14	0,5917056
2,10E-08	5,3E+14	0,5992133
2,10E-08	5,35E+14	0,6065158
2,10E-08	5,4E+14	0,6136205
2,10E-08	5,45E+14	0,6205344
2,10E-08	5,5E+14	0,6272644
2,10E-08	5,55E+14	0,6338169
2,10E-08	5,6E+14	0,6401982
2,10E-08	5,65E+14	0,646414
2,10E-08	5,7E+14	0,6524701
2,10E-08	5,75E+14	0,6583719
2,10E-08	5,8E+14	0,6641246
2,10E-08	5,85E+14	0,6697333
2,10E-08	5,9E+14	0,6752026
2,10E-08	5,95E+14	0,6805371
2,10E-08	6E+14	0,6857412
2,10E-08	6,05E+14	0,6908192
2,10E-08	6,1E+14	0,6957751
2,10E-08	6,15E+14	0,7006128
2,10E-08	6,2E+14	0,705336
2,10E-08	6,25E+14	0,7099483
2,10E-08	6,3E+14	0,7144531
2,10E-08	6,35E+14	0,7188538
2,10E-08	6,4E+14	0,7231535
2,10E-08	6,45E+14	0,7273553
2,10E-08	6,5E+14	0,7314621
2,10E-08	6,55E+14	0,7354769
2,10E-08	6,6E+14	0,7394023
2,10E-08	6,65E+14	0,7432409
2,10E-08	6,7E+14	0,7469953
2,10E-08	6,75E+14	0,750668
2,10E-08	6,8E+14	0,7542613
2,10E-08	6,85E+14	0,7577774
2,10E-08	6,9E+14	0,7612186
2,10E-08	6,95E+14	0,764587
2,10E-08	7E+14	0,7678846

ANNEXE 2

r(nm)	omega(hz)	epsilon
4,10E-08	4E+14	-0,2643576
4,10E-08	4,05E+14	-0,2339287
4,10E-08	4,1E+14	-0,2045854
4,10E-08	4,15E+14	-0,1762765
4,10E-08	4,2E+14	-0,1489541
4,10E-08	4,25E+14	-0,1225728
4,10E-08	4,3E+14	-0,09709
4,10E-08	4,35E+14	-0,0724651
4,10E-08	4,4E+14	-0,0486603
4,10E-08	4,45E+14	-0,0256394
4,10E-08	4,5E+14	-0,0033684
4,10E-08	4,55E+14	0,018185
4,10E-08	4,6E+14	0,0390512
4,10E-08	4,65E+14	0,0592591
4,10E-08	4,7E+14	0,0788361
4,10E-08	4,75E+14	0,0978083
4,10E-08	4,8E+14	0,1162004
4,10E-08	4,85E+14	0,1340356
4,10E-08	4,9E+14	0,1513363
4,10E-08	4,95E+14	0,1681236
4,10E-08	5E+14	0,1844177
4,10E-08	5,05E+14	0,2002376
4,10E-08	5,1E+14	0,2156016
4,10E-08	5,15E+14	0,2305271
4,10E-08	5,2E+14	0,2450306
4,10E-08	5,25E+14	0,2591278
4,10E-08	5,3E+14	0,2728338
4,10E-08	5,35E+14	0,2861629
4,10E-08	5,4E+14	0,2991288
4,10E-08	5,45E+14	0,3117446
4,10E-08	5,5E+14	0,3240228
4,10E-08	5,55E+14	0,3359754
4,10E-08	5,6E+14	0,3476137
4,10E-08	5,65E+14	0,3589486
4,10E-08	5,7E+14	0,3699907
4,10E-08	5,75E+14	0,3807498
4,10E-08	5,8E+14	0,3912357
4,10E-08	5,85E+14	0,4014575
4,10E-08	5,9E+14	0,4114239
4,10E-08	5,95E+14	0,4211435
4,10E-08	6E+14	0,4306243
4,10E-08	6,05E+14	0,439874
4,10E-08	6,1E+14	0,4489001
4,10E-08	6,15E+14	0,4577098
4,10E-08	6,2E+14	0,4663099
4,10E-08	6,25E+14	0,474707
4,10E-08	6,3E+14	0,4829075
4,10E-08	6,35E+14	0,4909174
4,10E-08	6,4E+14	0,4987426
4,10E-08	6,45E+14	0,5063888
4,10E-08	6,5E+14	0,5138613
4,10E-08	6,55E+14	0,5211655
4,10E-08	6,6E+14	0,5283062
4,10E-08	6,65E+14	0,5352884
4,10E-08	6,7E+14	0,5421166
4,10E-08	6,75E+14	0,5487955
4,10E-08	6,8E+14	0,5553293
4,10E-08	6,85E+14	0,5617222
4,10E-08	6,9E+14	0,5679782
4,10E-08	6,95E+14	0,5741012

Etude paramétrique d'un tige métallique

a	max epsilon	min epsilon
3,50E-07	0,983403	-1,0536541
r(nm)	omega(hz)	epsilon
1,00E-09	4E+14	0,9664508
1,00E-09	4,05E+14	0,9669504
1,00E-09	4,1E+14	0,9674374
1,00E-09	4,15E+14	0,9679123
1,00E-09	4,2E+14	0,9683754
1,00E-09	4,25E+14	0,9688272
1,00E-09	4,3E+14	0,9692681
1,00E-09	4,35E+14	0,9696984
1,00E-09	4,4E+14	0,9701186
1,00E-09	4,45E+14	0,970529
1,00E-09	4,5E+14	0,9709299
1,00E-09	4,55E+14	0,9713216
1,00E-09	4,6E+14	0,9717045
1,00E-09	4,65E+14	0,9720787
1,00E-09	4,7E+14	0,9724447
1,00E-09	4,75E+14	0,9728026
1,00E-09	4,8E+14	0,9731527
1,00E-09	4,85E+14	0,9734952
1,00E-09	4,9E+14	0,9738305
1,00E-09	4,95E+14	0,9741587
1,00E-09	5E+14	0,9744799
1,00E-09	5,05E+14	0,9747946
1,00E-09	5,1E+14	0,9751027
1,00E-09	5,15E+14	0,9754046
1,00E-09	5,2E+14	0,9757004
1,00E-09	5,25E+14	0,9759902
1,00E-09	5,3E+14	0,9762744
1,00E-09	5,35E+14	0,9765529
1,00E-09	5,4E+14	0,976826
1,00E-09	5,45E+14	0,9770938
1,00E-09	5,5E+14	0,9773565
1,00E-09	5,55E+14	0,9776142
1,00E-09	5,6E+14	0,977867
1,00E-09	5,65E+14	0,9781151
1,00E-09	5,7E+14	0,9783586
1,00E-09	5,75E+14	0,9785977
1,00E-09	5,8E+14	0,9788324
1,00E-09	5,85E+14	0,9790628
1,00E-09	5,9E+14	0,9792891
1,00E-09	5,95E+14	0,9795113
1,00E-09	6E+14	0,9797297
1,00E-09	6,05E+14	0,9799442
1,00E-09	6,1E+14	0,980155
1,00E-09	6,15E+14	0,9803621
1,00E-09	6,2E+14	0,9805657
1,00E-09	6,25E+14	0,9807658
1,00E-09	6,3E+14	0,9809625
1,00E-09	6,35E+14	0,981156
1,00E-09	6,4E+14	0,9813462
1,00E-09	6,45E+14	0,9815332
1,00E-09	6,5E+14	0,9817172
1,00E-09	6,55E+14	0,9818982
1,00E-09	6,6E+14	0,9820763
1,00E-09	6,65E+14	0,9822515
1,00E-09	6,7E+14	0,9824239
1,00E-09	6,75E+14	0,9825936
1,00E-09	6,8E+14	0,9827606
1,00E-09	6,85E+14	0,982925
1,00E-09	6,9E+14	0,9830868
1,00E-09	6,95E+14	0,9832462
1,00E-09	7E+14	0,983403

permittivité suivant Maslovski

r(nm)	omega(hz)	epsilon
2,10E-08	4E+14	0,536677
2,10E-08	4,05E+14	0,5477691
2,10E-08	4,1E+14	0,5584675
2,10E-08	4,15E+14	0,5687906
2,10E-08	4,2E+14	0,5787558
2,10E-08	4,25E+14	0,5883795
2,10E-08	4,3E+14	0,597677
2,10E-08	4,35E+14	0,606663
2,10E-08	4,4E+14	0,6153512
2,10E-08	4,45E+14	0,6237546
2,10E-08	4,5E+14	0,6318856
2,10E-08	4,55E+14	0,6397558
2,10E-08	4,6E+14	0,6473762
2,10E-08	4,65E+14	0,6547573
2,10E-08	4,7E+14	0,6619091
2,10E-08	4,75E+14	0,6688408
2,10E-08	4,8E+14	0,6755615
2,10E-08	4,85E+14	0,6820797
2,10E-08	4,9E+14	0,6884033
2,10E-08	4,95E+14	0,6945401
2,10E-08	5E+14	0,7004974
2,10E-08	5,05E+14	0,706282
2,10E-08	5,1E+14	0,7119007
2,10E-08	5,15E+14	0,7173596
2,10E-08	5,2E+14	0,7226648
2,10E-08	5,25E+14	0,727822
2,10E-08	5,3E+14	0,7328367
2,10E-08	5,35E+14	0,737714
2,10E-08	5,4E+14	0,742459
2,10E-08	5,45E+14	0,7470763
2,10E-08	5,5E+14	0,7515706
2,10E-08	5,55E+14	0,7559461
2,10E-08	5,6E+14	0,760207
2,10E-08	5,65E+14	0,7643573
2,10E-08	5,7E+14	0,7684007
2,10E-08	5,75E+14	0,772341
2,10E-08	5,8E+14	0,7761815
2,10E-08	5,85E+14	0,7799256
2,10E-08	5,9E+14	0,7835766
2,10E-08	5,95E+14	0,7871375
2,10E-08	6E+14	0,7906112
2,10E-08	6,05E+14	0,7940005
2,10E-08	6,1E+14	0,7973082
2,10E-08	6,15E+14	0,8005368
2,10E-08	6,2E+14	0,803689
2,10E-08	6,25E+14	0,8067669
2,10E-08	6,3E+14	0,8097731
2,10E-08	6,35E+14	0,8127096
2,10E-08	6,4E+14	0,8155787
2,10E-08	6,45E+14	0,8183823
2,10E-08	6,5E+14	0,8211224
2,10E-08	6,55E+14	0,823801
2,10E-08	6,6E+14	0,8264199
2,10E-08	6,65E+14	0,8289809
2,10E-08	6,7E+14	0,8314855
2,10E-08	6,75E+14	0,8339356
2,10E-08	6,8E+14	0,8363325
2,10E-08	6,85E+14	0,838678
2,10E-08	6,9E+14	0,8409734
2,10E-08	6,95E+14	0,8432201
2,10E-08	7E+14	0,8454196

ANNEXE 2

r(nm)	omega(hz)	epsilon
4,10E-08	4E+14	0,2051271
4,10E-08	4,05E+14	0,2243113
4,10E-08	4,1E+14	0,2428092
4,10E-08	4,15E+14	0,2606531
4,10E-08	4,2E+14	0,2778735
4,10E-08	4,25E+14	0,2944993
4,10E-08	4,3E+14	0,3105573
4,10E-08	4,35E+14	0,3260732
4,10E-08	4,4E+14	0,3410712
4,10E-08	4,45E+14	0,3555739
4,10E-08	4,5E+14	0,369603
4,10E-08	4,55E+14	0,383179
4,10E-08	4,6E+14	0,396321
4,10E-08	4,65E+14	0,4090474
4,10E-08	4,7E+14	0,4213755
4,10E-08	4,75E+14	0,4333219
4,10E-08	4,8E+14	0,444902
4,10E-08	4,85E+14	0,4561307
4,10E-08	4,9E+14	0,4670221
4,10E-08	4,95E+14	0,4775896
4,10E-08	5E+14	0,4878459
4,10E-08	5,05E+14	0,497803
4,10E-08	5,1E+14	0,5074726
4,10E-08	5,15E+14	0,5168655
4,10E-08	5,2E+14	0,5259922
4,10E-08	5,25E+14	0,5348628
4,10E-08	5,3E+14	0,5434866
4,10E-08	5,35E+14	0,5518728
4,10E-08	5,4E+14	0,56003
4,10E-08	5,45E+14	0,5679665
4,10E-08	5,5E+14	0,5756901
4,10E-08	5,55E+14	0,5832085
4,10E-08	5,6E+14	0,5905287
4,10E-08	5,65E+14	0,5976578
4,10E-08	5,7E+14	0,6046023
4,10E-08	5,75E+14	0,6113686
4,10E-08	5,8E+14	0,6179626
4,10E-08	5,85E+14	0,6243902
4,10E-08	5,9E+14	0,6306569
4,10E-08	5,95E+14	0,6367681
4,10E-08	6E+14	0,6427289
4,10E-08	6,05E+14	0,6485441
4,10E-08	6,1E+14	0,6542185
4,10E-08	6,15E+14	0,6597566
4,10E-08	6,2E+14	0,6651626
4,10E-08	6,25E+14	0,6704409
4,10E-08	6,3E+14	0,6755953
4,10E-08	6,35E+14	0,6806297
4,10E-08	6,4E+14	0,6855478
4,10E-08	6,45E+14	0,6903532
4,10E-08	6,5E+14	0,6950492
4,10E-08	6,55E+14	0,6996392
4,10E-08	6,6E+14	0,7041264
4,10E-08	6,65E+14	0,7085138
4,10E-08	6,7E+14	0,7128042
4,10E-08	6,75E+14	0,7171007
4,10E-08	6,8E+14	0,7211058
4,10E-08	6,85E+14	0,7251223
4,10E-08	6,9E+14	0,7290526
4,10E-08	6,95E+14	0,7328992

Etude paramétrique d'un tige métallique

a	max epsilon	min epsilon
4,00E-07	0,9874103	-0,2349175
r(nm)	omega(hz)	epsilon
1,00E-09	4E+14	0,974471
1,00E-09	4,05E+14	0,9748527
1,00E-09	4,1E+14	0,9752248
1,00E-09	4,15E+14	0,9755875
1,00E-09	4,2E+14	0,9759413
1,00E-09	4,25E+14	0,9762864
1,00E-09	4,3E+14	0,9766232
1,00E-09	4,35E+14	0,9769519
1,00E-09	4,4E+14	0,9772728
1,00E-09	4,45E+14	0,9775863
1,00E-09	4,5E+14	0,9778924
1,00E-09	4,55E+14	0,9781916
1,00E-09	4,6E+14	0,9784839
1,00E-09	4,65E+14	0,9787697
1,00E-09	4,7E+14	0,9790492
1,00E-09	4,75E+14	0,9793224
1,00E-09	4,8E+14	0,9795898
1,00E-09	4,85E+14	0,9798513
1,00E-09	4,9E+14	0,9801073
1,00E-09	4,95E+14	0,9803578
1,00E-09	5E+14	0,9806031
1,00E-09	5,05E+14	0,9808433
1,00E-09	5,1E+14	0,9810785
1,00E-09	5,15E+14	0,9813089
1,00E-09	5,2E+14	0,9815347
1,00E-09	5,25E+14	0,981756
1,00E-09	5,3E+14	0,9819728
1,00E-09	5,35E+14	0,9821854
1,00E-09	5,4E+14	0,9823938
1,00E-09	5,45E+14	0,9825982
1,00E-09	5,5E+14	0,9827986
1,00E-09	5,55E+14	0,9829953
1,00E-09	5,6E+14	0,9831882
1,00E-09	5,65E+14	0,9833775
1,00E-09	5,7E+14	0,9835633
1,00E-09	5,75E+14	0,9837457
1,00E-09	5,8E+14	0,9839248
1,00E-09	5,85E+14	0,9841006
1,00E-09	5,9E+14	0,9842732
1,00E-09	5,95E+14	0,9844428
1,00E-09	6E+14	0,9846093
1,00E-09	6,05E+14	0,9847729
1,00E-09	6,1E+14	0,9849337
1,00E-09	6,15E+14	0,9850917
1,00E-09	6,2E+14	0,985247
1,00E-09	6,25E+14	0,9853996
1,00E-09	6,3E+14	0,9855496
1,00E-09	6,35E+14	0,9856971
1,00E-09	6,4E+14	0,9858422
1,00E-09	6,45E+14	0,9859848
1,00E-09	6,5E+14	0,9861251
1,00E-09	6,55E+14	0,9862631
1,00E-09	6,6E+14	0,9863989
1,00E-09	6,65E+14	0,9865325
1,00E-09	6,7E+14	0,9866639
1,00E-09	6,75E+14	0,9867933
1,00E-09	6,8E+14	0,9869206
1,00E-09	6,85E+14	0,9870459
1,00E-09	6,9E+14	0,9871693
1,00E-09	6,95E+14	0,9872908
1,00E-09	7E+14	0,9874103

permittivité suivant Maslovski

r(nm)	omega(hz)	epsilon
2,10E-08	4E+14	0,6715909
2,10E-08	4,05E+14	0,6794677
2,10E-08	4,1E+14	0,6870644
2,10E-08	4,15E+14	0,6943942
2,10E-08	4,2E+14	0,7014694
2,10E-08	4,25E+14	0,7083017
2,10E-08	4,3E+14	0,714902
2,10E-08	4,35E+14	0,7212808
2,10E-08	4,4E+14	0,7274479
2,10E-08	4,45E+14	0,7334125
2,10E-08	4,5E+14	0,7391834
2,10E-08	4,55E+14	0,7447688
2,10E-08	4,6E+14	0,7501768
2,10E-08	4,65E+14	0,7554146
2,10E-08	4,7E+14	0,7604894
2,10E-08	4,75E+14	0,7654079
2,10E-08	4,8E+14	0,7701764
2,10E-08	4,85E+14	0,7748009
2,10E-08	4,9E+14	0,7792872
2,10E-08	4,95E+14	0,7836408
2,10E-08	5E+14	0,7878668
2,10E-08	5,05E+14	0,7919702
2,10E-08	5,1E+14	0,7959556
2,10E-08	5,15E+14	0,7998276
2,10E-08	5,2E+14	0,8035904
2,10E-08	5,25E+14	0,8072481
2,10E-08	5,3E+14	0,8108045
2,10E-08	5,35E+14	0,8142634
2,10E-08	5,4E+14	0,8176283
2,10E-08	5,45E+14	0,8209026
2,10E-08	5,5E+14	0,8240894
2,10E-08	5,55E+14	0,827192
2,10E-08	5,6E+14	0,8302131
2,10E-08	5,65E+14	0,8331558
2,10E-08	5,7E+14	0,8360225
2,10E-08	5,75E+14	0,8388161
2,10E-08	5,8E+14	0,8415388
2,10E-08	5,85E+14	0,8441931
2,10E-08	5,9E+14	0,8467813
2,10E-08	5,95E+14	0,8493055
2,10E-08	6E+14	0,8517678
2,10E-08	6,05E+14	0,8541703
2,10E-08	6,1E+14	0,8565148
2,10E-08	6,15E+14	0,8588032
2,10E-08	6,2E+14	0,8610373
2,10E-08	6,25E+14	0,8632188
2,10E-08	6,3E+14	0,8653494
2,10E-08	6,35E+14	0,8674305
2,10E-08	6,4E+14	0,8694637
2,10E-08	6,45E+14	0,8714506
2,10E-08	6,5E+14	0,8733924
2,10E-08	6,55E+14	0,8752905
2,10E-08	6,6E+14	0,8771463
2,10E-08	6,65E+14	0,8789609
2,10E-08	6,7E+14	0,8807356
2,10E-08	6,75E+14	0,8824716
2,10E-08	6,8E+14	0,88417
2,10E-08	6,85E+14	0,8858318
2,10E-08	6,9E+14	0,887458
2,10E-08	6,95E+14	0,8890498
2,10E-08	7E+14	0,8906081

ANNEXE 2

r(nm)	omega(hz)	epsilon
4,10E-08	4E+14	0,4605781
4,10E-08	4,05E+14	0,4736217
4,10E-08	4,1E+14	0,4861979
4,10E-08	4,15E+14	0,4983287
4,10E-08	4,2E+14	0,5100348
4,10E-08	4,25E+14	0,5213359
4,10E-08	4,3E+14	0,5322505
4,10E-08	4,35E+14	0,5427959
4,10E-08	4,4E+14	0,5529887
4,10E-08	4,45E+14	0,5628443
4,10E-08	4,5E+14	0,5723776
4,10E-08	4,55E+14	0,5816023
4,10E-08	4,6E+14	0,5905318
4,10E-08	4,65E+14	0,5991783
4,10E-08	4,7E+14	0,6075539
4,10E-08	4,75E+14	0,6156696
4,10E-08	4,8E+14	0,6235362
4,10E-08	4,85E+14	0,6311636
4,10E-08	4,9E+14	0,6385616
4,10E-08	4,95E+14	0,6457392
4,10E-08	5E+14	0,6527051
4,10E-08	5,05E+14	0,6594675
4,10E-08	5,1E+14	0,6660343
4,10E-08	5,15E+14	0,6724129
4,10E-08	5,2E+14	0,6786106
4,10E-08	5,25E+14	0,684634
4,10E-08	5,3E+14	0,6904896
4,10E-08	5,35E+14	0,6961836
4,10E-08	5,4E+14	0,701722
4,10E-08	5,45E+14	0,7071102
4,10E-08	5,5E+14	0,7123538
4,10E-08	5,55E+14	0,7174577
4,10E-08	5,6E+14	0,7224271
4,10E-08	5,65E+14	0,7272664
4,10E-08	5,7E+14	0,7319803
4,10E-08	5,75E+14	0,7365731
4,10E-08	5,8E+14	0,7410487
4,10E-08	5,85E+14	0,7454113
4,10E-08	5,9E+14	0,7496646
4,10E-08	5,95E+14	0,7538121
4,10E-08	6E+14	0,7578574
4,10E-08	6,05E+14	0,7618038
4,10E-08	6,1E+14	0,7656545
4,10E-08	6,15E+14	0,7694126
4,10E-08	6,2E+14	0,773081
4,10E-08	6,25E+14	0,7766626
4,10E-08	6,3E+14	0,78016
4,10E-08	6,35E+14	0,7835759
4,10E-08	6,4E+14	0,7869128
4,10E-08	6,45E+14	0,7901731
4,10E-08	6,5E+14	0,7933591
4,10E-08	6,55E+14	0,7964732
4,10E-08	6,6E+14	0,7995173
4,10E-08	6,65E+14	0,8024937
4,10E-08	6,7E+14	0,8054043
4,10E-08	6,75E+14	0,808251
4,10E-08	6,8E+14	0,8110357
4,10E-08	6,85E+14	0,8137601
4,10E-08	6,9E+14	0,8164261
4,10E-08	6,95E+14	0,8190352

Etude paramétrique d'un tige métallique

a	max epsilon	min epsilon
4,50E-07	0,990133	0,1868037
r(nm)	omega(hz)	epsilon
1,00E-09	4E+14	0,9799372
1,00E-09	4,05E+14	0,9802383
1,00E-09	4,1E+14	0,9805316
1,00E-09	4,15E+14	0,9808177
1,00E-09	4,2E+14	0,9810966
1,00E-09	4,25E+14	0,9813688
1,00E-09	4,3E+14	0,9816343
1,00E-09	4,35E+14	0,9818935
1,00E-09	4,4E+14	0,9821465
1,00E-09	4,45E+14	0,9823936
1,00E-09	4,5E+14	0,982635
1,00E-09	4,55E+14	0,9828708
1,00E-09	4,6E+14	0,9831013
1,00E-09	4,65E+14	0,9833266
1,00E-09	4,7E+14	0,9835469
1,00E-09	4,75E+14	0,9837623
1,00E-09	4,8E+14	0,983973
1,00E-09	4,85E+14	0,9841791
1,00E-09	4,9E+14	0,9843809
1,00E-09	4,95E+14	0,9845783
1,00E-09	5E+14	0,9847716
1,00E-09	5,05E+14	0,9849609
1,00E-09	5,1E+14	0,9851463
1,00E-09	5,15E+14	0,9853279
1,00E-09	5,2E+14	0,9855058
1,00E-09	5,25E+14	0,9856801
1,00E-09	5,3E+14	0,985851
1,00E-09	5,35E+14	0,9860184
1,00E-09	5,4E+14	0,9861827
1,00E-09	5,45E+14	0,9863437
1,00E-09	5,5E+14	0,9865016
1,00E-09	5,55E+14	0,9866565
1,00E-09	5,6E+14	0,9868085
1,00E-09	5,65E+14	0,9869576
1,00E-09	5,7E+14	0,987104
1,00E-09	5,75E+14	0,9872477
1,00E-09	5,8E+14	0,9873887
1,00E-09	5,85E+14	0,9875272
1,00E-09	5,9E+14	0,9876631
1,00E-09	5,95E+14	0,9877967
1,00E-09	6E+14	0,9879278
1,00E-09	6,05E+14	0,9880567
1,00E-09	6,1E+14	0,9881833
1,00E-09	6,15E+14	0,9883077
1,00E-09	6,2E+14	0,98843
1,00E-09	6,25E+14	0,9885501
1,00E-09	6,3E+14	0,9886683
1,00E-09	6,35E+14	0,9887844
1,00E-09	6,4E+14	0,9888986
1,00E-09	6,45E+14	0,989011
1,00E-09	6,5E+14	0,9891214
1,00E-09	6,55E+14	0,9892301
1,00E-09	6,6E+14	0,9893369
1,00E-09	6,65E+14	0,9894421
1,00E-09	6,7E+14	0,9895456
1,00E-09	6,75E+14	0,9896474
1,00E-09	6,8E+14	0,9897476
1,00E-09	6,85E+14	0,9898462
1,00E-09	6,9E+14	0,9899433
1,00E-09	6,95E+14	0,9900389
1,00E-09	7E+14	0,990133

permittivité suivant Maslovski

r(nm)	omega(hz)	epsilon
2,10E-08	4E+14	0,7565745
2,10E-08	4,05E+14	0,7624214
2,10E-08	4,1E+14	0,76806
2,10E-08	4,15E+14	0,7735003
2,10E-08	4,2E+14	0,7787513
2,10E-08	4,25E+14	0,7838218
2,10E-08	4,3E+14	0,78872
2,10E-08	4,35E+14	0,7934535
2,10E-08	4,4E+14	0,7980297
2,10E-08	4,45E+14	0,8024555
2,10E-08	4,5E+14	0,8067373
2,10E-08	4,55E+14	0,8108814
2,10E-08	4,6E+14	0,8148936
2,10E-08	4,65E+14	0,8187795
2,10E-08	4,7E+14	0,8225442
2,10E-08	4,75E+14	0,8261928
2,10E-08	4,8E+14	0,8297301
2,10E-08	4,85E+14	0,8331604
2,10E-08	4,9E+14	0,8364881
2,10E-08	4,95E+14	0,8397172
2,10E-08	5E+14	0,8428516
2,10E-08	5,05E+14	0,8458949
2,10E-08	5,1E+14	0,8488507
2,10E-08	5,15E+14	0,8517222
2,10E-08	5,2E+14	0,8545126
2,10E-08	5,25E+14	0,857225
2,10E-08	5,3E+14	0,8598623
2,10E-08	5,35E+14	0,8624271
2,10E-08	5,4E+14	0,8649222
2,10E-08	5,45E+14	0,86735
2,10E-08	5,5E+14	0,8697129
2,10E-08	5,55E+14	0,8720132
2,10E-08	5,6E+14	0,8742531
2,10E-08	5,65E+14	0,8764348
2,10E-08	5,7E+14	0,8785601
2,10E-08	5,75E+14	0,8806311
2,10E-08	5,8E+14	0,8826496
2,10E-08	5,85E+14	0,8846172
2,10E-08	5,9E+14	0,8865358
2,10E-08	5,95E+14	0,8884069
2,10E-08	6E+14	0,8902322
2,10E-08	6,05E+14	0,892013
2,10E-08	6,1E+14	0,8937508
2,10E-08	6,15E+14	0,895447
2,10E-08	6,2E+14	0,8971029
2,10E-08	6,25E+14	0,8987197
2,10E-08	6,3E+14	0,9002988
2,10E-08	6,35E+14	0,9018412
2,10E-08	6,4E+14	0,9033481
2,10E-08	6,45E+14	0,9048205
2,10E-08	6,5E+14	0,9062596
2,10E-08	6,55E+14	0,9076662
2,10E-08	6,6E+14	0,9090415
2,10E-08	6,65E+14	0,9103862
2,10E-08	6,7E+14	0,9117013
2,10E-08	6,75E+14	0,9129877
2,10E-08	6,8E+14	0,9142462
2,10E-08	6,85E+14	0,9154776
2,10E-08	6,9E+14	0,9166826
2,10E-08	6,95E+14	0,917862
2,10E-08	7E+14	0,9190166

ANNEXE 2

r(nm)	omega(hz)	epsilon
4,10E-08	4E+14	0,6132653
4,10E-08	4,05E+14	0,6226297
4,10E-08	4,1E+14	0,631658
4,10E-08	4,15E+14	0,6403662
4,10E-08	4,2E+14	0,6487691
4,10E-08	4,25E+14	0,6568809
4,10E-08	4,3E+14	0,6647149
4,10E-08	4,35E+14	0,6722836
4,10E-08	4,4E+14	0,6795989
4,10E-08	4,45E+14	0,6866719
4,10E-08	4,5E+14	0,6935133
4,10E-08	4,55E+14	0,700133
4,10E-08	4,6E+14	0,7065405
4,10E-08	4,65E+14	0,7127448
4,10E-08	4,7E+14	0,7187544
4,10E-08	4,75E+14	0,7245774
4,10E-08	4,8E+14	0,7302214
4,10E-08	4,85E+14	0,7356936
4,10E-08	4,9E+14	0,741001
4,10E-08	4,95E+14	0,7461502
4,10E-08	5E+14	0,7511472
4,10E-08	5,05E+14	0,7559982
4,10E-08	5,1E+14	0,7607087
4,10E-08	5,15E+14	0,7652841
4,10E-08	5,2E+14	0,7697295
4,10E-08	5,25E+14	0,7740498
4,10E-08	5,3E+14	0,7782496
4,10E-08	5,35E+14	0,7823334
4,10E-08	5,4E+14	0,7863054
4,10E-08	5,45E+14	0,7901697
4,10E-08	5,5E+14	0,7939301
4,10E-08	5,55E+14	0,7975903
4,10E-08	5,6E+14	0,8011538
4,10E-08	5,65E+14	0,8046241
4,10E-08	5,7E+14	0,8080043
4,10E-08	5,75E+14	0,8112975
4,10E-08	5,8E+14	0,8145067
4,10E-08	5,85E+14	0,8176348
4,10E-08	5,9E+14	0,8206843
4,10E-08	5,95E+14	0,823658
4,10E-08	6E+14	0,8265584
4,10E-08	6,05E+14	0,8293878
4,10E-08	6,1E+14	0,8321485
4,10E-08	6,15E+14	0,8348427
4,10E-08	6,2E+14	0,8374725
4,10E-08	6,25E+14	0,8400401
4,10E-08	6,3E+14	0,8425473
4,10E-08	6,35E+14	0,844996
4,10E-08	6,4E+14	0,847388
4,10E-08	6,45E+14	0,8497251
4,10E-08	6,5E+14	0,8520088
4,10E-08	6,55E+14	0,854241
4,10E-08	6,6E+14	0,856423
4,10E-08	6,65E+14	0,8585563
4,10E-08	6,7E+14	0,8606425
4,10E-08	6,75E+14	0,8626828
4,10E-08	6,8E+14	0,8646787
4,10E-08	6,85E+14	0,8666314
4,10E-08	6,9E+14	0,8685421
4,10E-08	6,95E+14	0,8704412

Etude paramétrique d'un SRR

r(nm)	max mu	min mu
3,00E-08	0,4813264	-4,2500987
d(nm)	omega(hz)	mu
5,00E-10	1E+14	0,4813264
5,00E-10	1,05E+14	0,4799684
5,00E-10	1,1E+14	0,4785495
5,00E-10	1,15E+14	0,4770689
5,00E-10	1,2E+14	0,4755256
5,00E-10	1,25E+14	0,4739185
5,00E-10	1,3E+14	0,4722465
5,00E-10	1,35E+14	0,4705085
5,00E-10	1,4E+14	0,4687033
5,00E-10	1,45E+14	0,4668296
5,00E-10	1,5E+14	0,4648861
5,00E-10	1,55E+14	0,4628715
5,00E-10	1,6E+14	0,4607842
5,00E-10	1,65E+14	0,4586228
5,00E-10	1,7E+14	0,4563856
5,00E-10	1,75E+14	0,454071
5,00E-10	1,8E+14	0,4516773
5,00E-10	1,85E+14	0,4492026
5,00E-10	1,9E+14	0,446645
5,00E-10	1,95E+14	0,4440025
5,00E-10	2E+14	0,441273
5,00E-10	2,05E+14	0,4384543
5,00E-10	2,1E+14	0,4355442
5,00E-10	2,15E+14	0,4325401
5,00E-10	2,2E+14	0,4294397
5,00E-10	2,25E+14	0,4262401
5,00E-10	2,3E+14	0,4229388
5,00E-10	2,35E+14	0,4195327
5,00E-10	2,4E+14	0,4160189
5,00E-10	2,45E+14	0,4123941
5,00E-10	2,5E+14	0,4086549
5,00E-10	2,55E+14	0,4047979
5,00E-10	2,6E+14	0,4008195
5,00E-10	2,65E+14	0,3967156
5,00E-10	2,7E+14	0,3924822
5,00E-10	2,75E+14	0,3881151
5,00E-10	2,8E+14	0,3836098
5,00E-10	2,85E+14	0,3789614
5,00E-10	2,9E+14	0,3741651
5,00E-10	2,95E+14	0,3692156
5,00E-10	3E+14	0,3641074
5,00E-10	3,05E+14	0,3588346
5,00E-10	3,1E+14	0,353391
5,00E-10	3,15E+14	0,3477703
5,00E-10	3,2E+14	0,3419655
5,00E-10	3,25E+14	0,3359694
5,00E-10	3,3E+14	0,3297743
5,00E-10	3,35E+14	0,3233722
5,00E-10	3,4E+14	0,3167544
5,00E-10	3,45E+14	0,3099119
5,00E-10	3,5E+14	0,3028349
5,00E-10	3,55E+14	0,2955134
5,00E-10	3,6E+14	0,2879363
5,00E-10	3,65E+14	0,2800922
5,00E-10	3,7E+14	0,2719687
5,00E-10	3,75E+14	0,2635527
5,00E-10	3,8E+14	0,2548302
5,00E-10	3,85E+14	0,2457863
5,00E-10	3,9E+14	0,2364051
5,00E-10	3,95E+14	0,2266695
5,00E-10	4E+14	0,2165613
5,00E-10	4,05E+14	0,2060609
5,00E-10	4,1E+14	0,1951473
5,00E-10	4,15E+14	0,1837979
5,00E-10	4,2E+14	0,1719886

perméabilité suivant Lorentz

r(nm)	omega(hz)	epsilon
5,00E-10	4,25E+14	0,1596932
5,00E-10	4,3E+14	0,1468834
5,00E-10	4,35E+14	0,1335287
5,00E-10	4,4E+14	0,1195964
5,00E-10	4,45E+14	0,1050505
5,00E-10	4,5E+14	0,0898524
5,00E-10	4,55E+14	0,0739599
5,00E-10	4,6E+14	0,057327
5,00E-10	4,65E+14	0,0399038
5,00E-10	4,7E+14	0,0216355
5,00E-10	4,75E+14	0,002462
5,00E-10	4,8E+14	-0,0176825
5,00E-10	4,85E+14	-0,0388703
5,00E-10	4,9E+14	-0,0611815
5,00E-10	4,95E+14	-0,0847043
5,00E-10	5E+14	-0,1095366
5,00E-10	5,05E+14	-0,1357872
5,00E-10	5,1E+14	-0,1635773
5,00E-10	5,15E+14	-0,1930423
5,00E-10	5,2E+14	-0,2243343
5,00E-10	5,25E+14	-0,2576242
5,00E-10	5,3E+14	-0,2931051
5,00E-10	5,35E+14	-0,3309959
5,00E-10	5,4E+14	-0,3715455
5,00E-10	5,45E+14	-0,4150388
5,00E-10	5,5E+14	-0,4618026
5,00E-10	5,55E+14	-0,5122144
5,00E-10	5,6E+14	-0,5667118
5,00E-10	5,65E+14	-0,6258058
5,00E-10	5,7E+14	-0,6900962
5,00E-10	5,75E+14	-0,7602921
5,00E-10	5,8E+14	-0,8372379
5,00E-10	5,85E+14	-0,9219472
5,00E-10	5,9E+14	-1,0156472
5,00E-10	5,95E+14	-1,1198386
5,00E-10	6E+14	-1,2363759
5,00E-10	6,05E+14	-1,3675779
5,00E-10	6,1E+14	-1,5163835
5,00E-10	6,15E+14	-1,6865732
5,00E-10	6,2E+14	-1,8830939
5,00E-10	6,25E+14	-2,112546
5,00E-10	6,3E+14	-2,3839376
5,00E-10	6,35E+14	-2,7098921
5,00E-10	6,4E+14	-3,108665
5,00E-10	6,45E+14	-3,6076779
5,00E-10	6,5E+14	-4,2500987
1,50E-09	1E+14	0,1543932
1,50E-09	1,05E+14	0,1535267
1,50E-09	1,1E+14	0,1526299
1,50E-09	1,15E+14	0,1517026
1,50E-09	1,2E+14	0,1507447
1,50E-09	1,25E+14	0,1497559
1,50E-09	1,3E+14	0,1487361
1,50E-09	1,35E+14	0,1476849
1,50E-09	1,4E+14	0,1466023
1,50E-09	1,45E+14	0,1454879
1,50E-09	1,5E+14	0,1443416
1,50E-09	1,55E+14	0,143163
1,50E-09	1,6E+14	0,1419519
1,50E-09	1,65E+14	0,1407082
1,50E-09	1,7E+14	0,1394314
1,50E-09	1,75E+14	0,1381213
1,50E-09	1,8E+14	0,1367777
1,50E-09	1,85E+14	0,1354002
1,50E-09	1,9E+14	0,1339885

ANNEXE 3

r(nm)	omega(hz)	epsilon
1,50E-09	1,95E+14	0,1325423
1,50E-09	2E+14	0,1310614
1,50E-09	2,05E+14	0,1295453
1,50E-09	2,1E+14	0,1279937
1,50E-09	2,15E+14	0,1264063
1,50E-09	2,2E+14	0,1247827
1,50E-09	2,25E+14	0,1231225
1,50E-09	2,3E+14	0,1214254
1,50E-09	2,35E+14	0,1196909
1,50E-09	2,4E+14	0,1179187
1,50E-09	2,45E+14	0,1161083
1,50E-09	2,5E+14	0,1142594
1,50E-09	2,55E+14	0,1123714
1,50E-09	2,6E+14	0,110444
1,50E-09	2,65E+14	0,1084766
1,50E-09	2,7E+14	0,1064688
1,50E-09	2,75E+14	0,1044201
1,50E-09	2,8E+14	0,10233
1,50E-09	2,85E+14	0,100198
1,50E-09	2,9E+14	0,0980236
1,50E-09	2,95E+14	0,0958062
1,50E-09	3E+14	0,0935452
1,50E-09	3,05E+14	0,0912401
1,50E-09	3,1E+14	0,0888903
1,50E-09	3,15E+14	0,0864952
1,50E-09	3,2E+14	0,0840542
1,50E-09	3,25E+14	0,0815667
1,50E-09	3,3E+14	0,0790319
1,50E-09	3,35E+14	0,0764492
1,50E-09	3,4E+14	0,073818
1,50E-09	3,45E+14	0,0711374
1,50E-09	3,5E+14	0,0684069
1,50E-09	3,55E+14	0,0656256
1,50E-09	3,6E+14	0,0627928
1,50E-09	3,65E+14	0,0599077
1,50E-09	3,7E+14	0,0569695
1,50E-09	3,75E+14	0,0539773
1,50E-09	3,8E+14	0,0509304
1,50E-09	3,85E+14	0,0478277
1,50E-09	3,9E+14	0,0446685
1,50E-09	3,95E+14	0,0414518
1,50E-09	4E+14	0,0381766
1,50E-09	4,05E+14	0,034842
1,50E-09	4,1E+14	0,031447
1,50E-09	4,15E+14	0,0279905
1,50E-09	4,2E+14	0,0244714
1,50E-09	4,25E+14	0,0208888
1,50E-09	4,3E+14	0,0172413
1,50E-09	4,35E+14	0,013528
1,50E-09	4,4E+14	0,0097476
1,50E-09	4,45E+14	0,0058989
1,50E-09	4,5E+14	0,0019807
1,50E-09	4,55E+14	-0,0020085
1,50E-09	4,6E+14	-0,0060698
1,50E-09	4,65E+14	-0,0102047
1,50E-09	4,7E+14	-0,0144145
1,50E-09	4,75E+14	-0,0187008
1,50E-09	4,8E+14	-0,023065
1,50E-09	4,85E+14	-0,0275087
1,50E-09	4,9E+14	-0,0320334
1,50E-09	4,95E+14	-0,0366407
1,50E-09	5E+14	-0,0413325
1,50E-09	5,05E+14	-0,0461103
1,50E-09	5,1E+14	-0,050976

Etude paramétrique d'un SRR

r(nm)	max mu	min mu
4,00E-08	1,9261992	-4,0309079
d(nm)	omega(hz)	mu
5,00E-10	1E+14	1,191068
5,00E-10	1,05E+14	1,1923107
5,00E-10	1,1E+14	1,1936195
5,00E-10	1,15E+14	1,1949966
5,00E-10	1,2E+14	1,1964445
5,00E-10	1,25E+14	1,1979661
5,00E-10	1,3E+14	1,1995643
5,00E-10	1,35E+14	1,2012422
5,00E-10	1,4E+14	1,2030032
5,00E-10	1,45E+14	1,2048509
5,00E-10	1,5E+14	1,2067893
5,00E-10	1,55E+14	1,2088225
5,00E-10	1,6E+14	1,2109551
5,00E-10	1,65E+14	1,213192
5,00E-10	1,7E+14	1,2155384
5,00E-10	1,75E+14	1,2180001
5,00E-10	1,8E+14	1,2205831
5,00E-10	1,85E+14	1,2232943
5,00E-10	1,9E+14	1,2261407
5,00E-10	1,95E+14	1,2291302
5,00E-10	2E+14	1,2322713
5,00E-10	2,05E+14	1,2355734
5,00E-10	2,1E+14	1,2390464
5,00E-10	2,15E+14	1,2427015
5,00E-10	2,2E+14	1,2465508
5,00E-10	2,25E+14	1,2506073
5,00E-10	2,3E+14	1,2548857
5,00E-10	2,35E+14	1,2594019
5,00E-10	2,4E+14	1,2641736
5,00E-10	2,45E+14	1,2692203
5,00E-10	2,5E+14	1,2745634
5,00E-10	2,55E+14	1,2802271
5,00E-10	2,6E+14	1,2862379
5,00E-10	2,65E+14	1,2926258
5,00E-10	2,7E+14	1,2994242
5,00E-10	2,75E+14	1,3066707
5,00E-10	2,8E+14	1,3144077
5,00E-10	2,85E+14	1,3226832
5,00E-10	2,9E+14	1,3315519
5,00E-10	2,95E+14	1,341076
5,00E-10	3E+14	1,3513272
5,00E-10	3,05E+14	1,3623878
5,00E-10	3,1E+14	1,3743532
5,00E-10	3,15E+14	1,3873346
5,00E-10	3,2E+14	1,4014623
5,00E-10	3,25E+14	1,4168901
5,00E-10	3,3E+14	1,4338004
5,00E-10	3,35E+14	1,4524118
5,00E-10	3,4E+14	1,4729884
5,00E-10	3,45E+14	1,4958518
5,00E-10	3,5E+14	1,5213981
5,00E-10	3,55E+14	1,5501208
5,00E-10	3,6E+14	1,5826424
5,00E-10	3,65E+14	1,6197599
5,00E-10	3,7E+14	1,6625099
5,00E-10	3,75E+14	1,7122667
5,00E-10	3,8E+14	1,7708917
5,00E-10	3,85E+14	1,8409698
5,00E-10	3,9E+14	1,9261992
5,00E-10	4,45E+14	-3,728169
5,00E-10	4,5E+14	-1,9688012
5,00E-10	4,55E+14	-1,1574947
5,00E-10	4,6E+14	-0,6906423
5,00E-10	4,65E+14	-0,3873318
5,00E-10	4,7E+14	-0,1744652

perméabilité suivant Lorentz

r(nm)	omega(hz)	epsilon
5,00E-10	4,75E+14	-0,0168586
5,00E-10	4,8E+14	0,1045178
5,00E-10	4,85E+14	0,2008561
5,00E-10	4,9E+14	0,2791689
5,00E-10	4,95E+14	0,3440741
5,00E-10	5E+14	0,3987363
5,00E-10	5,05E+14	0,4453969
5,00E-10	5,1E+14	0,485688
5,00E-10	5,15E+14	0,5208262
5,00E-10	5,2E+14	0,5517367
5,00E-10	5,25E+14	0,579136
5,00E-10	5,3E+14	0,6035874
5,00E-10	5,35E+14	0,6255396
5,00E-10	5,4E+14	0,645355
5,00E-10	5,45E+14	0,6633291
5,00E-10	5,5E+14	0,6797052
5,00E-10	5,55E+14	0,6946858
5,00E-10	5,6E+14	0,7084405
5,00E-10	5,65E+14	0,7211125
5,00E-10	5,7E+14	0,7328236
5,00E-10	5,75E+14	0,7436779
5,00E-10	5,8E+14	0,7537652
5,00E-10	5,85E+14	0,763163
5,00E-10	5,9E+14	0,7719388
5,00E-10	5,95E+14	0,7801516
5,00E-10	6E+14	0,7878532
5,00E-10	6,05E+14	0,7950891
5,00E-10	6,1E+14	0,8018998
5,00E-10	6,15E+14	0,8083211
5,00E-10	6,2E+14	0,8143848
5,00E-10	6,25E+14	0,8201196
5,00E-10	6,3E+14	0,8255511
5,00E-10	6,35E+14	0,8307021
5,00E-10	6,4E+14	0,8355936
5,00E-10	6,45E+14	0,8402441
5,00E-10	6,5E+14	0,8446709
5,00E-10	6,55E+14	0,8488892
5,00E-10	6,6E+14	0,8529131
5,00E-10	6,65E+14	0,8567556
5,00E-10	6,7E+14	0,8604282
5,00E-10	6,75E+14	0,8639417
5,00E-10	6,8E+14	0,8673061
5,00E-10	6,85E+14	0,8705303
5,00E-10	6,9E+14	0,8736228
5,00E-10	6,95E+14	0,8765911
5,00E-10	7E+14	0,8794426
1,50E-09	1E+14	0,3728284
1,50E-09	1,05E+14	0,3712742
1,50E-09	1,1E+14	0,3696609
1,50E-09	1,15E+14	0,3679877
1,50E-09	1,2E+14	0,3662537
1,50E-09	1,25E+14	0,364458
1,50E-09	1,3E+14	0,3625995
1,50E-09	1,35E+14	0,3606774
1,50E-09	1,4E+14	0,3586904
1,50E-09	1,45E+14	0,3566376
1,50E-09	1,5E+14	0,3545178
1,50E-09	1,55E+14	0,3523297
1,50E-09	1,6E+14	0,3500722
1,50E-09	1,65E+14	0,3477439
1,50E-09	1,7E+14	0,3453435
1,50E-09	1,75E+14	0,3428696
1,50E-09	1,8E+14	0,3403206
1,50E-09	1,85E+14	0,3376951
1,50E-09	1,9E+14	0,3349915

ANNEXE 3

r(nm)	omega(hz)	epsilon
1,50E-09	1,95E+14	0,3322081
1,50E-09	2E+14	0,3293432
1,50E-09	2,05E+14	0,326395
1,50E-09	2,1E+14	0,3233616
1,50E-09	2,15E+14	0,320241
1,50E-09	2,2E+14	0,3170312
1,50E-09	2,25E+14	0,3137301
1,50E-09	2,3E+14	0,3103355
1,50E-09	2,35E+14	0,306845
1,50E-09	2,4E+14	0,3032564
1,50E-09	2,45E+14	0,2995669
1,50E-09	2,5E+14	0,2957741
1,50E-09	2,55E+14	0,2918752
1,50E-09	2,6E+14	0,2878674
1,50E-09	2,65E+14	0,2837476
1,50E-09	2,7E+14	0,2795128
1,50E-09	2,75E+14	0,2751598
1,50E-09	2,8E+14	0,2706851
1,50E-09	2,85E+14	0,2660852
1,50E-09	2,9E+14	0,2613564
1,50E-09	2,95E+14	0,2564949
1,50E-09	3E+14	0,2514965
1,50E-09	3,05E+14	0,2463571
1,50E-09	3,1E+14	0,2410722
1,50E-09	3,15E+14	0,2356372
1,50E-09	3,2E+14	0,2300471
1,50E-09	3,25E+14	0,2242969
1,50E-09	3,3E+14	0,2183813
1,50E-09	3,35E+14	0,2122946
1,50E-09	3,4E+14	0,2060308
1,50E-09	3,45E+14	0,1995839
1,50E-09	3,5E+14	0,1929472
1,50E-09	3,55E+14	0,186114
1,50E-09	3,6E+14	0,179077
1,50E-09	3,65E+14	0,1718286
1,50E-09	3,7E+14	0,1643608
1,50E-09	3,75E+14	0,1566652
1,50E-09	3,8E+14	0,148733
1,50E-09	3,85E+14	0,1405547
1,50E-09	3,9E+14	0,1321203
1,50E-09	3,95E+14	0,1234195
1,50E-09	4E+14	0,1144412
1,50E-09	4,05E+14	0,1051735
1,50E-09	4,1E+14	0,0956041
1,50E-09	4,15E+14	0,0857199
1,50E-09	4,2E+14	0,0755067
1,50E-09	4,25E+14	0,0649499
1,50E-09	4,3E+14	0,0540335
1,50E-09	4,35E+14	0,0427408
1,50E-09	4,4E+14	0,0310539
1,50E-09	4,45E+14	0,0189538
1,50E-09	4,5E+14	0,00642
1,50E-09	4,55E+14	-0,006569
1,50E-09	4,6E+14	-0,0200366
1,50E-09	4,65E+14	-0,0340076
1,50E-09	4,7E+14	-0,0485087
1,50E-09	4,75E+14	-0,0635685
1,50E-09	4,8E+14	-0,0792177
1,50E-09	4,85E+14	-0,0954893
1,50E-09	4,9E+14	-0,1124191
1,50E-09	4,95E+14	-0,1300453
1,50E-09	5E+14	-0,1484095
1,50E-09	5,05E+14	-0,1675565
1,50E-09	5,1E+14	-0,1875351

Etude paramétrique d'un SRR

r(nm)	max mu	min mu
5,00E-08	1,9394043	-4,6340281
d(nm)	omega(hz)	mu
5,00E-10	3,45E+14	-4,1239946
5,00E-10	3,5E+14	-3,5142178
5,00E-10	3,55E+14	-3,0283879
5,00E-10	3,6E+14	-2,6322948
5,00E-10	3,65E+14	-2,303255
5,00E-10	3,7E+14	-2,0256344
5,00E-10	3,75E+14	-1,7883071
5,00E-10	3,8E+14	-1,5831399
5,00E-10	3,85E+14	-1,4040495
5,00E-10	3,9E+14	-1,2463948
5,00E-10	3,95E+14	-1,1065737
5,00E-10	4E+14	-0,9817477
5,00E-10	4,05E+14	-0,8696496
5,00E-10	4,1E+14	-0,7684469
5,00E-10	4,15E+14	-0,6766424
5,00E-10	4,2E+14	-0,5930007
5,00E-10	4,25E+14	-0,5164933
5,00E-10	4,3E+14	-0,4462576
5,00E-10	4,35E+14	-0,381564
5,00E-10	4,4E+14	-0,3217918
5,00E-10	4,45E+14	-0,2664093
5,00E-10	4,5E+14	-0,2149587
5,00E-10	4,55E+14	-0,1670433
5,00E-10	4,6E+14	-0,1223179
5,00E-10	4,65E+14	-0,0804809
5,00E-10	4,7E+14	-0,0412671
5,00E-10	4,75E+14	-0,0044428
5,00E-10	4,8E+14	0,0301987
5,00E-10	4,85E+14	0,0628414
5,00E-10	4,9E+14	0,0936489
5,00E-10	4,95E+14	0,1227678
5,00E-10	5E+14	0,1503294
5,00E-10	5,05E+14	0,176452
5,00E-10	5,1E+14	0,201242
5,00E-10	5,15E+14	0,2247959
5,00E-10	5,2E+14	0,2472011
5,00E-10	5,25E+14	0,2685369
5,00E-10	5,3E+14	0,2888756
5,00E-10	5,35E+14	0,3082833
5,00E-10	5,4E+14	0,3268201
5,00E-10	5,45E+14	0,3445414
5,00E-10	5,5E+14	0,3614979
5,00E-10	5,55E+14	0,3777363
5,00E-10	5,6E+14	0,3932995
5,00E-10	5,65E+14	0,4082271
5,00E-10	5,7E+14	0,4225558
5,00E-10	5,75E+14	0,4363195
5,00E-10	5,8E+14	0,4495495
5,00E-10	5,85E+14	0,4622751
5,00E-10	5,9E+14	0,4745233
5,00E-10	5,95E+14	0,4863194
5,00E-10	6E+14	0,4976868
5,00E-10	6,05E+14	0,5086474
5,00E-10	6,1E+14	0,5192217
5,00E-10	6,15E+14	0,5294289
5,00E-10	6,2E+14	0,5392867
5,00E-10	6,25E+14	0,5488121
5,00E-10	6,3E+14	0,5580207
5,00E-10	6,35E+14	0,5669273
5,00E-10	6,4E+14	0,5755458
5,00E-10	6,45E+14	0,5838892
5,00E-10	6,5E+14	0,5919699
5,00E-10	6,55E+14	0,5997993
5,00E-10	6,6E+14	0,6073885
5,00E-10	6,65E+14	0,6147478

perméabilité suivant Lorentz

r(nm)	omega(hz)	epsilon
5,00E-10	6,7E+14	0,6218869
5,00E-10	6,75E+14	0,6288149
5,00E-10	6,8E+14	0,6355406
5,00E-10	6,85E+14	0,6420723
5,00E-10	6,9E+14	0,6484177
5,00E-10	6,95E+14	0,6545843
5,00E-10	7E+14	0,6605791
1,50E-09	1E+14	0,7513989
1,50E-09	1,05E+14	0,7501541
1,50E-09	1,1E+14	0,7488554
1,50E-09	1,15E+14	0,7475012
1,50E-09	1,2E+14	0,74609
1,50E-09	1,25E+14	0,7446201
1,50E-09	1,3E+14	0,7430897
1,50E-09	1,35E+14	0,7414969
1,50E-09	1,4E+14	0,7398398
1,50E-09	1,45E+14	0,7381163
1,50E-09	1,5E+14	0,7363241
1,50E-09	1,55E+14	0,7344609
1,50E-09	1,6E+14	0,7325241
1,50E-09	1,65E+14	0,7305112
1,50E-09	1,7E+14	0,7284193
1,50E-09	1,75E+14	0,7262455
1,50E-09	1,8E+14	0,7239865
1,50E-09	1,85E+14	0,721639
1,50E-09	1,9E+14	0,7191995
1,50E-09	1,95E+14	0,7166641
1,50E-09	2E+14	0,7140287
1,50E-09	2,05E+14	0,7112891
1,50E-09	2,1E+14	0,7084407
1,50E-09	2,15E+14	0,7054785
1,50E-09	2,2E+14	0,7023973
1,50E-09	2,25E+14	0,6991915
1,50E-09	2,3E+14	0,6958552
1,50E-09	2,35E+14	0,6923818
1,50E-09	2,4E+14	0,6887645
1,50E-09	2,45E+14	0,684996
1,50E-09	2,5E+14	0,6810683
1,50E-09	2,55E+14	0,6769729
1,50E-09	2,6E+14	0,6727005
1,50E-09	2,65E+14	0,6682413
1,50E-09	2,7E+14	0,6635845
1,50E-09	2,75E+14	0,6587187
1,50E-09	2,8E+14	0,6536312
1,50E-09	2,85E+14	0,6483085
1,50E-09	2,9E+14	0,6427358
1,50E-09	2,95E+14	0,6368971
1,50E-09	3E+14	0,6307748
1,50E-09	3,05E+14	0,6243498
1,50E-09	3,1E+14	0,6176011
1,50E-09	3,15E+14	0,6105059
1,50E-09	3,2E+14	0,6030389
1,50E-09	3,25E+14	0,5951724
1,50E-09	3,3E+14	0,5868757
1,50E-09	3,35E+14	0,5781148
1,50E-09	3,4E+14	0,5688522
1,50E-09	3,45E+14	0,5590461
1,50E-09	3,5E+14	0,5486497
1,50E-09	3,55E+14	0,5376107
1,50E-09	3,6E+14	0,5258706
1,50E-09	3,65E+14	0,5133633
1,50E-09	3,7E+14	0,500014
1,50E-09	3,75E+14	0,4857379
1,50E-09	3,8E+14	0,4704384
1,50E-09	3,85E+14	0,4540049

ANNEXE 3

r(nm)	omega(hz)	epsilon
1,50E-09	3,9E+14	0,43631
1,50E-09	3,95E+14	0,4172068
1,50E-09	4E+14	0,3965241
1,50E-09	4,05E+14	0,374062
1,50E-09	4,1E+14	0,3495854
1,50E-09	4,15E+14	0,3228153
1,50E-09	4,2E+14	0,2934192
1,50E-09	4,25E+14	0,2609965
1,50E-09	4,3E+14	0,2250607
1,50E-09	4,35E+14	0,1850151
1,50E-09	4,4E+14	0,1401197
1,50E-09	4,45E+14	0,0894452
1,50E-09	4,5E+14	0,0318083
1,50E-09	4,55E+14	-0,0343207
1,50E-09	4,6E+14	-0,1109558
1,50E-09	4,65E+14	-0,2008024
1,50E-09	4,7E+14	-0,3075826
1,50E-09	4,75E+14	-0,4365617
1,50E-09	4,8E+14	-0,595441
1,50E-09	4,85E+14	-0,7959501
1,50E-09	4,9E+14	-1,0568783
1,50E-09	4,95E+14	-1,4103247
1,50E-09	5E+14	-1,9160212
1,50E-09	5,05E+14	-2,6992216
1,50E-09	5,1E+14	-4,0744891
1,50E-09	5,15E+14	1,9394043
1,50E-09	5,95E+14	1,8703694
1,50E-09	6E+14	1,8103546
1,50E-09	6,05E+14	1,757705
1,50E-09	6,1E+14	1,7111469
1,50E-09	6,15E+14	1,6696844
1,50E-09	6,2E+14	1,6325275
1,50E-09	6,25E+14	1,5990411
1,50E-09	6,3E+14	1,5687095
1,50E-09	6,35E+14	1,5411089
1,50E-09	6,4E+14	1,5158885
1,50E-09	6,45E+14	1,4927547
1,50E-09	6,5E+14	1,4714606
1,50E-09	6,55E+14	1,4517965
1,50E-09	6,6E+14	1,4335835
1,50E-09	6,65E+14	1,4166679
1,50E-09	6,7E+14	1,400917
1,50E-09	6,75E+14	1,3862155
1,50E-09	6,8E+14	1,3724628
1,50E-09	6,85E+14	1,359571
1,50E-09	6,9E+14	1,3474624
1,50E-09	6,95E+14	1,3360685
1,50E-09	7E+14	1,3253286
2,50E-09	1E+14	0,43395
2,50E-09	1,05E+14	0,4320055
2,50E-09	1,1E+14	0,4299923
2,50E-09	1,15E+14	0,427909
2,50E-09	1,2E+14	0,4257543
2,50E-09	1,25E+14	0,4235266
2,50E-09	1,3E+14	0,4212246
2,50E-09	1,35E+14	0,4188465
2,50E-09	1,4E+14	0,4163908
2,50E-09	1,45E+14	0,4138558
2,50E-09	1,5E+14	0,4112396
2,50E-09	1,55E+14	0,4085403
2,50E-09	1,6E+14	0,405756
2,50E-09	1,65E+14	0,4028846
2,50E-09	1,7E+14	0,399924
2,50E-09	1,75E+14	0,396872

Etude paramétrique d'un SRR

r(nm)	max mu	min mu
6,00E-08	1,9947149	-4,7442906
d(nm)	omega(hz)	mu
5,00E-10	2,85E+14	-4,7442906
5,00E-10	2,9E+14	-4,2414039
5,00E-10	2,95E+14	-3,8132808
5,00E-10	3E+14	-3,44453
5,00E-10	3,05E+14	-3,1237101
5,00E-10	3,1E+14	-2,8421384
5,00E-10	3,15E+14	-2,5931076
5,00E-10	3,2E+14	-2,3713537
5,00E-10	3,25E+14	-2,1726881
5,00E-10	3,3E+14	-1,9937363
5,00E-10	3,35E+14	-1,8317491
5,00E-10	3,4E+14	-1,6844648
5,00E-10	3,45E+14	-1,5500051
5,00E-10	3,5E+14	-1,4267976
5,00E-10	3,55E+14	-1,3135161
5,00E-10	3,6E+14	-1,2090338
5,00E-10	3,65E+14	-1,1123878
5,00E-10	3,7E+14	-1,0227499
5,00E-10	3,75E+14	-0,9394041
5,00E-10	3,8E+14	-0,8617282
5,00E-10	3,85E+14	-0,7891788
5,00E-10	3,9E+14	-0,7212795
5,00E-10	3,95E+14	-0,6576107
5,00E-10	4E+14	-0,5978015
5,00E-10	4,05E+14	-0,5415227
5,00E-10	4,1E+14	-0,4884812
5,00E-10	4,15E+14	-0,4384153
5,00E-10	4,2E+14	-0,3910905
5,00E-10	4,25E+14	-0,3462959
5,00E-10	4,3E+14	-0,3038418
5,00E-10	4,35E+14	-0,2635565
5,00E-10	4,4E+14	-0,2252846
5,00E-10	4,45E+14	-0,1888852
5,00E-10	4,5E+14	-0,1542299
5,00E-10	4,55E+14	-0,1212016
5,00E-10	4,6E+14	-0,0896936
5,00E-10	4,65E+14	-0,0596078
5,00E-10	4,7E+14	-0,0308547
5,00E-10	4,75E+14	-0,0033517
5,00E-10	4,8E+14	0,022977
5,00E-10	4,85E+14	0,0482015
5,00E-10	4,9E+14	0,0723863
5,00E-10	4,95E+14	0,0955911
5,00E-10	5E+14	0,1178713
5,00E-10	5,05E+14	0,1392782
5,00E-10	5,1E+14	0,1598594
5,00E-10	5,15E+14	0,1796592
5,00E-10	5,2E+14	0,1987188
5,00E-10	5,25E+14	0,2170768
5,00E-10	5,3E+14	0,2347689
5,00E-10	5,35E+14	0,2518288
5,00E-10	5,4E+14	0,2682876
5,00E-10	5,45E+14	0,2841749
5,00E-10	5,5E+14	0,2995181
5,00E-10	5,55E+14	0,314343
5,00E-10	5,6E+14	0,3286739
5,00E-10	5,65E+14	0,3425335
5,00E-10	5,7E+14	0,3559433
5,00E-10	5,75E+14	0,3689234
5,00E-10	5,8E+14	0,381493
5,00E-10	5,85E+14	0,3936699
5,00E-10	5,9E+14	0,405471
5,00E-10	5,95E+14	0,4169124
5,00E-10	6E+14	0,4280093
5,00E-10	6,05E+14	0,4387758

perméabilité suivant Lorentz

r(nm)	omega(hz)	epsilon
5,00E-10	6,1E+14	0,4492255
5,00E-10	6,15E+14	0,4593714
5,00E-10	6,2E+14	0,4692255
5,00E-10	6,25E+14	0,4787995
5,00E-10	6,3E+14	0,4881042
5,00E-10	6,35E+14	0,4971501
5,00E-10	6,4E+14	0,5059471
5,00E-10	6,45E+14	0,5145046
5,00E-10	6,5E+14	0,5228315
5,00E-10	6,55E+14	0,5309364
5,00E-10	6,6E+14	0,5388275
5,00E-10	6,65E+14	0,5465124
5,00E-10	6,7E+14	0,5539985
5,00E-10	6,75E+14	0,5612929
5,00E-10	6,8E+14	0,5684024
5,00E-10	6,85E+14	0,5753333
5,00E-10	6,9E+14	0,5820918
5,00E-10	6,95E+14	0,5886837
5,00E-10	7E+14	0,5951148
1,50E-09	1E+14	1,3632634
1,50E-09	1,05E+14	1,3665769
1,50E-09	1,1E+14	1,3700631
1,50E-09	1,15E+14	1,3737301
1,50E-09	1,2E+14	1,3775868
1,50E-09	1,25E+14	1,3816428
1,50E-09	1,3E+14	1,3859083
1,50E-09	1,35E+14	1,3903945
1,50E-09	1,4E+14	1,3951136
1,50E-09	1,45E+14	1,4000787
1,50E-09	1,5E+14	1,4053042
1,50E-09	1,55E+14	1,4108056
1,50E-09	1,6E+14	1,4165999
1,50E-09	1,65E+14	1,4227058
1,50E-09	1,7E+14	1,4291435
1,50E-09	1,75E+14	1,4359353
1,50E-09	1,8E+14	1,4431056
1,50E-09	1,85E+14	1,4506814
1,50E-09	1,9E+14	1,4586924
1,50E-09	1,95E+14	1,4671713
1,50E-09	2E+14	1,4761545
1,50E-09	2,05E+14	1,4856823
1,50E-09	2,1E+14	1,4957996
1,50E-09	2,15E+14	1,5065567
1,50E-09	2,2E+14	1,5180097
1,50E-09	2,25E+14	1,5302218
1,50E-09	2,3E+14	1,5432644
1,50E-09	2,35E+14	1,5572179
1,50E-09	2,4E+14	1,5721742
1,50E-09	2,45E+14	1,5882375
1,50E-09	2,5E+14	1,6055279
1,50E-09	2,55E+14	1,6241832
1,50E-09	2,6E+14	1,6443631
1,50E-09	2,65E+14	1,6662533
1,50E-09	2,7E+14	1,6900714
1,50E-09	2,75E+14	1,7160737
1,50E-09	2,8E+14	1,7445643
1,50E-09	2,85E+14	1,7759068
1,50E-09	2,9E+14	1,8105396
1,50E-09	2,95E+14	1,8489963
1,50E-09	3E+14	1,8919324
1,50E-09	3,05E+14	1,9401632
1,50E-09	3,1E+14	1,9947149
1,50E-09	4E+14	-4,4298026
1,50E-09	4,05E+14	-2,8759467
1,50E-09	4,1E+14	-2,0061622

ANNEXE 3

r(nm)	omega(hz)	epsilon
1,50E-09	4,15E+14	-1,4502931
1,50E-09	4,2E+14	-1,0644324
1,50E-09	4,25E+14	-0,7809734
1,50E-09	4,3E+14	-0,5639599
1,50E-09	4,35E+14	-0,3925049
1,50E-09	4,4E+14	-0,2536452
1,50E-09	4,45E+14	-0,1389091
1,50E-09	4,5E+14	-0,0425263
1,50E-09	4,55E+14	0,0395692
1,50E-09	4,6E+14	0,1103253
1,50E-09	4,65E+14	0,1719311
1,50E-09	4,7E+14	0,2260467
1,50E-09	4,75E+14	0,2739533
1,50E-09	4,8E+14	0,3166562
1,50E-09	4,85E+14	0,3549545
1,50E-09	4,9E+14	0,3894919
1,50E-09	4,95E+14	0,4207927
1,50E-09	5E+14	0,449288
1,50E-09	5,05E+14	0,4753357
1,50E-09	5,1E+14	0,4992353
1,50E-09	5,15E+14	0,5212394
1,50E-09	5,2E+14	0,5415628
1,50E-09	5,25E+14	0,5603886
1,50E-09	5,3E+14	0,5778747
1,50E-09	5,35E+14	0,5941574
1,50E-09	5,4E+14	0,6093551
1,50E-09	5,45E+14	0,6235713
1,50E-09	5,5E+14	0,6368967
1,50E-09	5,55E+14	0,6494113
1,50E-09	5,6E+14	0,6611856
1,50E-09	5,65E+14	0,6722824
1,50E-09	5,7E+14	0,6827575
1,50E-09	5,75E+14	0,6926608
1,50E-09	5,8E+14	0,7020369
1,50E-09	5,85E+14	0,7109261
1,50E-09	5,9E+14	0,7193646
1,50E-09	5,95E+14	0,727385
1,50E-09	6E+14	0,7350169
1,50E-09	6,05E+14	0,7422874
1,50E-09	6,1E+14	0,749221
1,50E-09	6,15E+14	0,7558398
1,50E-09	6,2E+14	0,7621644
1,50E-09	6,25E+14	0,7682135
1,50E-09	6,3E+14	0,7740041
1,50E-09	6,35E+14	0,7795522
1,50E-09	6,4E+14	0,7848721
1,50E-09	6,45E+14	0,7899773
1,50E-09	6,5E+14	0,7948801
1,50E-09	6,55E+14	0,7995921
1,50E-09	6,6E+14	0,8041237
1,50E-09	6,65E+14	0,8084848
1,50E-09	6,7E+14	0,8126846
1,50E-09	6,75E+14	0,8167316
1,50E-09	6,8E+14	0,8206336
1,50E-09	6,85E+14	0,8243982
1,50E-09	6,9E+14	0,828032
1,50E-09	6,95E+14	0,8315417
1,50E-09	7E+14	0,8349332
2,50E-09	1E+14	0,7771447
2,50E-09	1,05E+14	0,77577
2,50E-09	1,1E+14	0,7743388
2,50E-09	1,15E+14	0,7728492
2,50E-09	1,2E+14	0,7712993
2,50E-09	1,25E+14	0,769687

Etude paramétrique d'un SRR

r(nm)	max mu	min mu
7,00E-08	1,9606547	-4,687681
d(nm)	omega(hz)	mu
5,00E-10	2,55E+14	-4,5130192
5,00E-10	2,6E+14	-4,1330365
5,00E-10	2,65E+14	-3,7965826
5,00E-10	2,7E+14	-3,4967117
5,00E-10	2,75E+14	-3,2278767
5,00E-10	2,8E+14	-2,9855941
5,00E-10	2,85E+14	-2,7662009
5,00E-10	2,9E+14	-2,5666753
5,00E-10	2,95E+14	-2,3845025
5,00E-10	3E+14	-2,2175725
5,00E-10	3,05E+14	-2,0641022
5,00E-10	3,1E+14	-1,9225743
5,00E-10	3,15E+14	-1,7916899
5,00E-10	3,2E+14	-1,6703303
5,00E-10	3,25E+14	-1,557527
5,00E-10	3,3E+14	-1,4524377
5,00E-10	3,35E+14	-1,3543257
5,00E-10	3,4E+14	-1,2625446
5,00E-10	3,45E+14	-1,1765246
5,00E-10	3,5E+14	-1,0957614
5,00E-10	3,55E+14	-1,0198075
5,00E-10	3,6E+14	-0,9482639
5,00E-10	3,65E+14	-0,8807742
5,00E-10	3,7E+14	-0,8170188
5,00E-10	3,75E+14	-0,7567103
5,00E-10	3,8E+14	-0,6995899
5,00E-10	3,85E+14	-0,6454233
5,00E-10	3,9E+14	-0,5939987
5,00E-10	3,95E+14	-0,5451235
5,00E-10	4E+14	-0,4986223
5,00E-10	4,05E+14	-0,4543355
5,00E-10	4,1E+14	-0,412117
5,00E-10	4,15E+14	-0,3718331
5,00E-10	4,2E+14	-0,3333612
5,00E-10	4,25E+14	-0,2965886
5,00E-10	4,3E+14	-0,2614116
5,00E-10	4,35E+14	-0,2277345
5,00E-10	4,4E+14	-0,1954692
5,00E-10	4,45E+14	-0,1645339
5,00E-10	4,5E+14	-0,1348532
5,00E-10	4,55E+14	-0,1063568
5,00E-10	4,6E+14	-0,0789797
5,00E-10	4,65E+14	-0,0526614
5,00E-10	4,7E+14	-0,0273455
5,00E-10	4,75E+14	-0,0029796
5,00E-10	4,8E+14	0,0204854
5,00E-10	4,85E+14	0,0430953
5,00E-10	4,9E+14	0,0648927
5,00E-10	4,95E+14	0,0859178
5,00E-10	5E+14	0,1062082
5,00E-10	5,05E+14	0,1257989
5,00E-10	5,1E+14	0,1447232
5,00E-10	5,15E+14	0,163012
5,00E-10	5,2E+14	0,1806946
5,00E-10	5,25E+14	0,1977985
5,00E-10	5,3E+14	0,2143496
5,00E-10	5,35E+14	0,2303723
5,00E-10	5,4E+14	0,2458898
5,00E-10	5,45E+14	0,2609237
5,00E-10	5,5E+14	0,2754946
5,00E-10	5,55E+14	0,2896221
5,00E-10	5,6E+14	0,3033245
5,00E-10	5,65E+14	0,3166193
5,00E-10	5,7E+14	0,3295231
5,00E-10	5,75E+14	0,3420515

perméabilité suivant Lorentz

r(nm)	omega(hz)	epsilon
5,00E-10	5,8E+14	0,3542194
5,00E-10	5,85E+14	0,3660409
5,00E-10	5,9E+14	0,3775295
5,00E-10	5,95E+14	0,388698
5,00E-10	6E+14	0,3995584
5,00E-10	6,05E+14	0,4101224
5,00E-10	6,1E+14	0,4204009
5,00E-10	6,15E+14	0,4304045
5,00E-10	6,2E+14	0,4401432
5,00E-10	6,25E+14	0,4496264
5,00E-10	6,3E+14	0,4588633
5,00E-10	6,35E+14	0,4678626
5,00E-10	6,4E+14	0,4766325
5,00E-10	6,45E+14	0,4851811
5,00E-10	6,5E+14	0,4935159
5,00E-10	6,55E+14	0,5016441
5,00E-10	6,6E+14	0,5095728
5,00E-10	6,65E+14	0,5173085
5,00E-10	6,7E+14	0,5248575
5,00E-10	6,75E+14	0,5322262
5,00E-10	6,8E+14	0,5394201
5,00E-10	6,85E+14	0,5464451
5,00E-10	6,9E+14	0,5533064
5,00E-10	6,95E+14	0,5600092
5,00E-10	7E+14	0,5665584
1,50E-09	3,3E+14	-4,687681
1,50E-09	3,35E+14	-3,8784929
1,50E-09	3,4E+14	-3,2639322
1,50E-09	3,45E+14	-2,7814262
1,50E-09	3,5E+14	-2,3926265
1,50E-09	3,55E+14	-2,0727207
1,50E-09	3,6E+14	-1,8049444
1,50E-09	3,65E+14	-1,5775632
1,50E-09	3,7E+14	-1,3821175
1,50E-09	3,75E+14	-1,2123549
1,50E-09	3,8E+14	-1,0635546
1,50E-09	3,85E+14	-0,932085
1,50E-09	3,9E+14	-0,8151071
1,50E-09	3,95E+14	-0,7103695
1,50E-09	4E+14	-0,6160637
1,50E-09	4,05E+14	-0,5307203
1,50E-09	4,1E+14	-0,4531332
1,50E-09	4,15E+14	-0,3823031
1,50E-09	4,2E+14	-0,3173951
1,50E-09	4,25E+14	-0,2577062
1,50E-09	4,3E+14	-0,2026399
1,50E-09	4,35E+14	-0,1516875
1,50E-09	4,4E+14	-0,1044119
1,50E-09	4,45E+14	-0,0604356
1,50E-09	4,5E+14	-0,019431
1,50E-09	4,55E+14	0,0188876
1,50E-09	4,6E+14	0,0547707
1,50E-09	4,65E+14	0,0884384
1,50E-09	4,7E+14	0,1200855
1,50E-09	4,75E+14	0,1498845
1,50E-09	4,8E+14	0,177989
1,50E-09	4,85E+14	0,2045359
1,50E-09	4,9E+14	0,2296482
1,50E-09	4,95E+14	0,2534359
1,50E-09	5E+14	0,2759984
1,50E-09	5,05E+14	0,2974254
1,50E-09	5,1E+14	0,3177981
1,50E-09	5,15E+14	0,33719
1,50E-09	5,2E+14	0,3556683
1,50E-09	5,25E+14	0,373294

ANNEXE 3

r(nm)	omega(hz)	epsilon
1,50E-09	5,3E+14	0,3901229
1,50E-09	5,35E+14	0,406206
1,50E-09	5,4E+14	0,4215903
1,50E-09	5,45E+14	0,4363187
1,50E-09	5,5E+14	0,4504307
1,50E-09	5,55E+14	0,463963
1,50E-09	5,6E+14	0,4769492
1,50E-09	5,65E+14	0,4894205
1,50E-09	5,7E+14	0,5014057
1,50E-09	5,75E+14	0,5129316
1,50E-09	5,8E+14	0,524023
1,50E-09	5,85E+14	0,534703
1,50E-09	5,9E+14	0,5449933
1,50E-09	5,95E+14	0,5549137
1,50E-09	6E+14	0,5644832
1,50E-09	6,05E+14	0,5737191
1,50E-09	6,1E+14	0,5826378
1,50E-09	6,15E+14	0,5912546
1,50E-09	6,2E+14	0,599584
1,50E-09	6,25E+14	0,6076394
1,50E-09	6,3E+14	0,6154334
1,50E-09	6,35E+14	0,6229781
1,50E-09	6,4E+14	0,6302845
1,50E-09	6,45E+14	0,6373632
1,50E-09	6,5E+14	0,6442243
1,50E-09	6,55E+14	0,6508877
1,50E-09	6,6E+14	0,6573302
1,50E-09	6,65E+14	0,6635924
1,50E-09	6,7E+14	0,6696713
1,50E-09	6,75E+14	0,6755747
1,50E-09	6,8E+14	0,6813094
1,50E-09	6,85E+14	0,6868823
1,50E-09	6,9E+14	0,6922998
1,50E-09	6,95E+14	0,6975678
1,50E-09	7E+14	0,7026922
2,50E-09	1E+14	1,3000826
2,50E-09	1,05E+14	1,3031922
2,50E-09	1,1E+14	1,3064573
2,50E-09	1,15E+14	1,3098859
2,50E-09	1,2E+14	1,3134867
2,50E-09	1,25E+14	1,3172691
2,50E-09	1,3E+14	1,3212431
2,50E-09	1,35E+14	1,3254199
2,50E-09	1,4E+14	1,3298115
2,50E-09	1,45E+14	1,3344308
2,50E-09	1,5E+14	1,3392922
2,50E-09	1,55E+14	1,3444111
2,50E-09	1,6E+14	1,3498046
2,50E-09	1,65E+14	1,3554914
2,50E-09	1,7E+14	1,3614919
2,50E-09	1,75E+14	1,3678287
2,50E-09	1,8E+14	1,3745265
2,50E-09	1,85E+14	1,381613
2,50E-09	1,9E+14	1,3891186
2,50E-09	1,95E+14	1,397077
2,50E-09	2E+14	1,4055261
2,50E-09	2,05E+14	1,4145078
2,50E-09	2,1E+14	1,4240696
2,50E-09	2,15E+14	1,4342643
2,50E-09	2,2E+14	1,445152
2,50E-09	2,25E+14	1,4568005
2,50E-09	2,3E+14	1,4692869
2,50E-09	2,35E+14	1,4826993
2,50E-09	2,4E+14	1,4971388

Etude paramétrique d'un SRR

r(nm)	max mu	min mu
8,00E-08	1,970855	-4,7043634
d(nm)	omega(hz)	mu
5,00E-10	2,35E+14	-4,5261474
5,00E-10	2,4E+14	-4,1892831
5,00E-10	2,45E+14	-3,8857815
5,00E-10	2,5E+14	-3,6110573
5,00E-10	2,55E+14	-3,3613234
5,00E-10	2,6E+14	-3,1334243
5,00E-10	2,65E+14	-2,9247104
5,00E-10	2,7E+14	-2,7329406
5,00E-10	2,75E+14	-2,5562063
5,00E-10	2,8E+14	-2,3928726
5,00E-10	2,85E+14	-2,2415309
5,00E-10	2,9E+14	-2,100961
5,00E-10	2,95E+14	-1,970101
5,00E-10	3E+14	-1,8480222
5,00E-10	3,05E+14	-1,7339094
5,00E-10	3,1E+14	-1,6270435
5,00E-10	3,15E+14	-1,5267886
5,00E-10	3,2E+14	-1,4325796
5,00E-10	3,25E+14	-1,3439132
5,00E-10	3,3E+14	-1,2603394
5,00E-10	3,35E+14	-1,1814549
5,00E-10	3,4E+14	-1,106897
5,00E-10	3,45E+14	-1,036339
5,00E-10	3,5E+14	-0,9694854
5,00E-10	3,55E+14	-0,9060686
5,00E-10	3,6E+14	-0,8458458
5,00E-10	3,65E+14	-0,7885958
5,00E-10	3,7E+14	-0,7341172
5,00E-10	3,75E+14	-0,6822258
5,00E-10	3,8E+14	-0,632753
5,00E-10	3,85E+14	-0,5855442
5,00E-10	3,9E+14	-0,5404576
5,00E-10	3,95E+14	-0,4973624
5,00E-10	4E+14	-0,4561382
5,00E-10	4,05E+14	-0,4166739
5,00E-10	4,1E+14	-0,3788667
5,00E-10	4,15E+14	-0,3426216
5,00E-10	4,2E+14	-0,3078503
5,00E-10	4,25E+14	-0,274471
5,00E-10	4,3E+14	-0,2424077
5,00E-10	4,35E+14	-0,2115896
5,00E-10	4,4E+14	-0,1819506
5,00E-10	4,45E+14	-0,1534294
5,00E-10	4,5E+14	-0,1259685
5,00E-10	4,55E+14	-0,0995142
5,00E-10	4,6E+14	-0,0740163
5,00E-10	4,65E+14	-0,0494277
5,00E-10	4,7E+14	-0,0257043
5,00E-10	4,75E+14	-0,0028047
5,00E-10	4,8E+14	0,0193099
5,00E-10	4,85E+14	0,0406762
5,00E-10	4,9E+14	0,0613285
5,00E-10	4,95E+14	0,0812992
5,00E-10	5E+14	0,1006189
5,00E-10	5,05E+14	0,1193163
5,00E-10	5,1E+14	0,1374187
5,00E-10	5,15E+14	0,1549517
5,00E-10	5,2E+14	0,1719396
5,00E-10	5,25E+14	0,1884053
5,00E-10	5,3E+14	0,2043706
5,00E-10	5,35E+14	0,2198562
5,00E-10	5,4E+14	0,2348814
5,00E-10	5,45E+14	0,2494649
5,00E-10	5,5E+14	0,2636242
5,00E-10	5,55E+14	0,277376

perméabilité suivant Lorentz

r(nm)	omega(hz)	epsilon
5,00E-10	5,6E+14	0,2907362
5,00E-10	5,65E+14	0,3037198
5,00E-10	5,7E+14	0,3163412
5,00E-10	5,75E+14	0,328614
5,00E-10	5,8E+14	0,3405513
5,00E-10	5,85E+14	0,3521655
5,00E-10	5,9E+14	0,3634683
5,00E-10	5,95E+14	0,374471
5,00E-10	6E+14	0,3851844
5,00E-10	6,05E+14	0,3956188
5,00E-10	6,1E+14	0,4057839
5,00E-10	6,15E+14	0,4156891
5,00E-10	6,2E+14	0,4253434
5,00E-10	6,25E+14	0,4347554
5,00E-10	6,3E+14	0,4439332
5,00E-10	6,35E+14	0,4528847
5,00E-10	6,4E+14	0,4616175
5,00E-10	6,45E+14	0,4701387
5,00E-10	6,5E+14	0,4784552
5,00E-10	6,55E+14	0,4865737
5,00E-10	6,6E+14	0,4945005
5,00E-10	6,65E+14	0,5022417
5,00E-10	6,7E+14	0,5098031
5,00E-10	6,75E+14	0,5171904
5,00E-10	6,8E+14	0,524409
5,00E-10	6,85E+14	0,531464
5,00E-10	6,9E+14	0,5383605
5,00E-10	6,95E+14	0,5451032
5,00E-10	7E+14	0,5516967
1,50E-09	2,85E+14	-4,6584757
1,50E-09	2,9E+14	-4,0881803
1,50E-09	2,95E+14	-3,6160542
1,50E-09	3E+14	-3,218875
1,50E-09	3,05E+14	-2,8802066
1,50E-09	3,1E+14	-2,5880887
1,50E-09	3,15E+14	-2,3336107
1,50E-09	3,2E+14	-2,109998
1,50E-09	3,25E+14	-1,9120081
1,50E-09	3,3E+14	-1,7355207
1,50E-09	3,35E+14	-1,5772529
1,50E-09	3,4E+14	-1,4345566
1,50E-09	3,45E+14	-1,3052723
1,50E-09	3,5E+14	-1,1876213
1,50E-09	3,55E+14	-1,0801255
1,50E-09	3,6E+14	-0,9815462
1,50E-09	3,65E+14	-0,890838
1,50E-09	3,7E+14	-0,8071121
1,50E-09	3,75E+14	-0,7296082
1,50E-09	3,8E+14	-0,6576721
1,50E-09	3,85E+14	-0,590738
1,50E-09	3,9E+14	-0,5283138
1,50E-09	3,95E+14	-0,4699695
1,50E-09	4E+14	-0,415328
1,50E-09	4,05E+14	-0,3640569
1,50E-09	4,1E+14	-0,3158624
1,50E-09	4,15E+14	-0,2704833
1,50E-09	4,2E+14	-0,2276874
1,50E-09	4,25E+14	-0,1872669
1,50E-09	4,3E+14	-0,1490355
1,50E-09	4,35E+14	-0,1128261
1,50E-09	4,4E+14	-0,0784876
1,50E-09	4,45E+14	-0,0458837
1,50E-09	4,5E+14	-0,014891
1,50E-09	4,55E+14	0,0146028
1,50E-09	4,6E+14	0,0426998

ANNEXE 3

r(nm)	omega(hz)	epsilon
1,50E-09	4,65E+14	0,0694931
1,50E-09	4,7E+14	0,0950677
1,50E-09	4,75E+14	0,1195018
1,50E-09	4,8E+14	0,1428666
1,50E-09	4,85E+14	0,1652281
1,50E-09	4,9E+14	0,1866466
1,50E-09	4,95E+14	0,207178
1,50E-09	5E+14	0,2268739
1,50E-09	5,05E+14	0,2457818
1,50E-09	5,1E+14	0,263946
1,50E-09	5,15E+14	0,2814074
1,50E-09	5,2E+14	0,298204
1,50E-09	5,25E+14	0,3143714
1,50E-09	5,3E+14	0,3299424
1,50E-09	5,35E+14	0,3449479
1,50E-09	5,4E+14	0,3594164
1,50E-09	5,45E+14	0,3733748
1,50E-09	5,5E+14	0,3868482
1,50E-09	5,55E+14	0,3998601
1,50E-09	5,6E+14	0,4124326
1,50E-09	5,65E+14	0,4245863
1,50E-09	5,7E+14	0,4363406
1,50E-09	5,75E+14	0,4477139
1,50E-09	5,8E+14	0,4587232
1,50E-09	5,85E+14	0,4693848
1,50E-09	5,9E+14	0,479714
1,50E-09	5,95E+14	0,4897252
1,50E-09	6E+14	0,4994319
1,50E-09	6,05E+14	0,5088469
1,50E-09	6,1E+14	0,5179826
1,50E-09	6,15E+14	0,5268503
1,50E-09	6,2E+14	0,535461
1,50E-09	6,25E+14	0,5438249
1,50E-09	6,3E+14	0,5519519
1,50E-09	6,35E+14	0,5598512
1,50E-09	6,4E+14	0,5675317
1,50E-09	6,45E+14	0,5750018
1,50E-09	6,5E+14	0,5822694
1,50E-09	6,55E+14	0,5893421
1,50E-09	6,6E+14	0,5962272
1,50E-09	6,65E+14	0,6029315
1,50E-09	6,7E+14	0,6094615
1,50E-09	6,75E+14	0,6158236
1,50E-09	6,8E+14	0,6220236
1,50E-09	6,85E+14	0,6280672
1,50E-09	6,9E+14	0,63396
1,50E-09	6,95E+14	0,639707
1,50E-09	7E+14	0,6453133
2,50E-09	3,25E+14	-4,4094655
2,50E-09	3,3E+14	-3,5626357
2,50E-09	3,35E+14	-2,9384313
2,50E-09	3,4E+14	-2,4593571
2,50E-09	3,45E+14	-2,0801442
2,50E-09	3,5E+14	-1,7725761
2,50E-09	3,55E+14	-1,5181501
2,50E-09	3,6E+14	-1,3042291
2,50E-09	3,65E+14	-1,1218873
2,50E-09	3,7E+14	-0,9646415
2,50E-09	3,75E+14	-0,8276688
2,50E-09	3,8E+14	-0,7073072
2,50E-09	3,85E+14	-0,6007262
2,50E-09	3,9E+14	-0,5057033
2,50E-09	3,95E+14	-0,4204692
2,50E-09	4E+14	-0,3435981

Etude paramétrique d'un SRR

r(nm)	max mu	min mu
9,00E-08	1,9775452	-4,7632198
d(nm)	omega(hz)	mu
5,00E-10	2,2E+14	-4,6759584
5,00E-10	2,25E+14	-4,3510493
5,00E-10	2,3E+14	-4,0557936
5,00E-10	2,35E+14	-3,7864606
5,00E-10	2,4E+14	-3,5399135
5,00E-10	2,45E+14	-3,3134963
5,00E-10	2,5E+14	-3,1049455
5,00E-10	2,55E+14	-2,9123202
5,00E-10	2,6E+14	-2,7339471
5,00E-10	2,65E+14	-2,5683757
5,00E-10	2,7E+14	-2,4143433
5,00E-10	2,75E+14	-2,270745
5,00E-10	2,8E+14	-2,1366103
5,00E-10	2,85E+14	-2,0110833
5,00E-10	2,9E+14	-1,8934065
5,00E-10	2,95E+14	-1,782907
5,00E-10	3E+14	-1,6789851
5,00E-10	3,05E+14	-1,5811047
5,00E-10	3,1E+14	-1,4887852
5,00E-10	3,15E+14	-1,4015947
5,00E-10	3,2E+14	-1,3191436
5,00E-10	3,25E+14	-1,24108
5,00E-10	3,3E+14	-1,1670852
5,00E-10	3,35E+14	-1,0968699
5,00E-10	3,4E+14	-1,0301707
5,00E-10	3,45E+14	-0,9667476
5,00E-10	3,5E+14	-0,9063815
5,00E-10	3,55E+14	-0,8488717
5,00E-10	3,6E+14	-0,7940342
5,00E-10	3,65E+14	-0,7417002
5,00E-10	3,7E+14	-0,6917141
5,00E-10	3,75E+14	-0,643933
5,00E-10	3,8E+14	-0,5982245
5,00E-10	3,85E+14	-0,5544668
5,00E-10	3,9E+14	-0,5125466
5,00E-10	3,95E+14	-0,4723594
5,00E-10	4E+14	-0,433808
5,00E-10	4,05E+14	-0,3968022
5,00E-10	4,1E+14	-0,3612579
5,00E-10	4,15E+14	-0,3270969
5,00E-10	4,2E+14	-0,2942465
5,00E-10	4,25E+14	-0,2626384
5,00E-10	4,3E+14	-0,2322092
5,00E-10	4,35E+14	-0,2028994
5,00E-10	4,4E+14	-0,1746532
5,00E-10	4,45E+14	-0,1474186
5,00E-10	4,5E+14	-0,1211465
5,00E-10	4,55E+14	-0,095791
5,00E-10	4,6E+14	-0,0713089
5,00E-10	4,65E+14	-0,0476597
5,00E-10	4,7E+14	-0,0248049
5,00E-10	4,75E+14	-0,0027087
5,00E-10	4,8E+14	0,0186629
5,00E-10	4,85E+14	0,039342
5,00E-10	4,9E+14	0,0593588
5,00E-10	4,95E+14	0,078742
5,00E-10	5E+14	0,0975185
5,00E-10	5,05E+14	0,1157139
5,00E-10	5,1E+14	0,1333525
5,00E-10	5,15E+14	0,1504571
5,00E-10	5,2E+14	0,1670497
5,00E-10	5,25E+14	0,1831507
5,00E-10	5,3E+14	0,1987798
5,00E-10	5,35E+14	0,2139557
5,00E-10	5,4E+14	0,2286959

perméabilité suivant Lorentz

r(nm)	omega(hz)	epsilon
5,00E-10	5,45E+14	0,2430173
5,00E-10	5,5E+14	0,2569359
5,00E-10	5,55E+14	0,270467
5,00E-10	5,6E+14	0,283625
5,00E-10	5,65E+14	0,2964237
5,00E-10	5,7E+14	0,3088764
5,00E-10	5,75E+14	0,3209957
5,00E-10	5,8E+14	0,3327934
5,00E-10	5,85E+14	0,3442811
5,00E-10	5,9E+14	0,3554697
5,00E-10	5,95E+14	0,3663696
5,00E-10	6E+14	0,376991
5,00E-10	6,05E+14	0,3873432
5,00E-10	6,1E+14	0,3974355
5,00E-10	6,15E+14	0,4072766
5,00E-10	6,2E+14	0,4168749
5,00E-10	6,25E+14	0,4262385
5,00E-10	6,3E+14	0,435375
5,00E-10	6,35E+14	0,4442918
5,00E-10	6,4E+14	0,4529961
5,00E-10	6,45E+14	0,4614946
5,00E-10	6,5E+14	0,4697938
5,00E-10	6,55E+14	0,4778999
5,00E-10	6,6E+14	0,4858191
5,00E-10	6,65E+14	0,4935571
5,00E-10	6,7E+14	0,5011194
5,00E-10	6,75E+14	0,5085114
5,00E-10	6,8E+14	0,5157383
5,00E-10	6,85E+14	0,5228049
5,00E-10	6,9E+14	0,529716
5,00E-10	6,95E+14	0,5364763
5,00E-10	7E+14	0,5430901
1,50E-09	2,55E+14	-4,6077601
1,50E-09	2,6E+14	-4,1501823
1,50E-09	2,65E+14	-3,7558112
1,50E-09	2,7E+14	-3,4125199
1,50E-09	2,75E+14	-3,1110933
1,50E-09	2,8E+14	-2,8444041
1,50E-09	2,85E+14	-2,606853
1,50E-09	2,9E+14	-2,3939806
1,50E-09	2,95E+14	-2,202191
1,50E-09	3E+14	-2,0285529
1,50E-09	3,05E+14	-1,8706527
1,50E-09	3,1E+14	-1,7264851
1,50E-09	3,15E+14	-1,5943705
1,50E-09	3,2E+14	-1,4728912
1,50E-09	3,25E+14	-1,3608427
1,50E-09	3,3E+14	-1,2571947
1,50E-09	3,35E+14	-1,1610611
1,50E-09	3,4E+14	-1,0716753
1,50E-09	3,45E+14	-0,9883712
1,50E-09	3,5E+14	-0,9105667
1,50E-09	3,55E+14	-0,8377514
1,50E-09	3,6E+14	-0,7694756
1,50E-09	3,65E+14	-0,7053417
1,50E-09	3,7E+14	-0,6449967
1,50E-09	3,75E+14	-0,5881266
1,50E-09	3,8E+14	-0,5344503
1,50E-09	3,85E+14	-0,4837165
1,50E-09	3,9E+14	-0,4356989
1,50E-09	3,95E+14	-0,3901939
1,50E-09	4E+14	-0,3470172
1,50E-09	4,05E+14	-0,3060021
1,50E-09	4,1E+14	-0,2669973
1,50E-09	4,15E+14	-0,2298649

ANNEXE 3

r(nm)	omega(hz)	epsilon
1,50E-09	4,2E+14	-0,1944794
1,50E-09	4,25E+14	-0,1607259
1,50E-09	4,3E+14	-0,1284995
1,50E-09	4,35E+14	-0,0977037
1,50E-09	4,4E+14	-0,06825
1,50E-09	4,45E+14	-0,0400568
1,50E-09	4,5E+14	-0,013049
1,50E-09	4,55E+14	0,0128427
1,50E-09	4,6E+14	0,0376825
1,50E-09	4,65E+14	0,0615299
1,50E-09	4,7E+14	0,0844399
1,50E-09	4,75E+14	0,1064637
1,50E-09	4,8E+14	0,127649
1,50E-09	4,85E+14	0,14804
1,50E-09	4,9E+14	0,167678
1,50E-09	4,95E+14	0,1866015
1,50E-09	5E+14	0,2048466
1,50E-09	5,05E+14	0,2224469
1,50E-09	5,1E+14	0,239434
1,50E-09	5,15E+14	0,2558375
1,50E-09	5,2E+14	0,271685
1,50E-09	5,25E+14	0,2870026
1,50E-09	5,3E+14	0,3018147
1,50E-09	5,35E+14	0,3161445
1,50E-09	5,4E+14	0,3300135
1,50E-09	5,45E+14	0,3434423
1,50E-09	5,5E+14	0,35645
1,50E-09	5,55E+14	0,3690549
1,50E-09	5,6E+14	0,3812741
1,50E-09	5,65E+14	0,3931239
1,50E-09	5,7E+14	0,4046197
1,50E-09	5,75E+14	0,4157761
1,50E-09	5,8E+14	0,4266067
1,50E-09	5,85E+14	0,4371247
1,50E-09	5,9E+14	0,4473425
1,50E-09	5,95E+14	0,4572718
1,50E-09	6E+14	0,4669238
1,50E-09	6,05E+14	0,4763092
1,50E-09	6,1E+14	0,4854381
1,50E-09	6,15E+14	0,49432
1,50E-09	6,2E+14	0,5029641
1,50E-09	6,25E+14	0,5113793
1,50E-09	6,3E+14	0,5195736
1,50E-09	6,35E+14	0,5275552
1,50E-09	6,4E+14	0,5353315
1,50E-09	6,45E+14	0,5429098
1,50E-09	6,5E+14	0,550297
1,50E-09	6,55E+14	0,5574997
1,50E-09	6,6E+14	0,5645242
1,50E-09	6,65E+14	0,5713764
1,50E-09	6,7E+14	0,5780622
1,50E-09	6,75E+14	0,5845871
1,50E-09	6,8E+14	0,5909564
1,50E-09	6,85E+14	0,5971751
1,50E-09	6,9E+14	0,6032481
1,50E-09	6,95E+14	0,6091801
1,50E-09	7E+14	0,6149755
2,50E-09	2,8E+14	-4,7632198
2,50E-09	2,85E+14	-4,0939158
2,50E-09	2,9E+14	-3,557262
2,50E-09	2,95E+14	-3,117493
2,50E-09	3E+14	-2,7506377
2,50E-09	3,05E+14	-2,4400284
2,50E-09	3,1E+14	-2,1737157

الملخص:

في السنوات الأخيرة، المتماثيريوي (métamatériaux) أخذت مكانا كبيرا في عملية البحث لما لهذه المواد الجديدة التي تسمح بتطوير مكونات بصرية جديدة لتطبيقات جديدة. مثال "عدسة كاملة"، وهذا يعني، لا تخضع لحد الانحراف، هي مثال نموذجي لمجال التطبيقات الجديدة استنادا إلى استخدام معامل إنكسار سلبي.

هذا الموضوع ينطوي على دراسة المتماثيريوي (métamatériaux) و تطبيقاتها في الطيف المرئي و كذا محاكاة معامل الإنكسار السالب . إلى حد الآن عدة مفاهيم و تجارب قامت على ترددات من الميكرويف إلى التيراهتز .

العمل في الطيف المرئي و الحصول على معامل إنكسار سالب يعد مجال بحث حاليا بالنسبة للمتماثيريوي (métamatériaux) التي تتكون أساسا من المعادن و دراسة عامل التشتت و الإمتصاص للموجة الكهرومغناطيسية على هاته المواد الجديدة.

والغرض من هذا العمل معالجة العديد من التحديات من المجال العلمي وعلى وجه الخصوص لتطوير نماذج بسيطة لوصف كيفية استجابة المتماثيريوي (métamatériaux) ذو معامل إنكسار سالب للترددات الضوئية.

الكلمات المفتاحية: المحاكاة ، نانوفوتونيك ، متماثيريوي ، كهرومغناطيسية.

Résumé:

Les métamatériaux prennent de l'ampleur ces dernières années. Les nouvelles propriétés permettent d'envisager la réalisation de nouveaux composants optiques aux fonctionnalités inédites. La « lentille parfaite », c'est-à-dire non soumise à la limite de diffraction, est l'exemple typique d'un composant original et très prometteur en termes d'applications, basé sur l'utilisation d'un métamatériau à indice de réfraction négatif.

Ce sujet porte sur l'étude des métamatériaux et de leurs applications dans le visible, en particulier la simulation d'un indice de réfraction négatif. Jusqu'à présent, un certain nombre de concepts ont été établis et un certain nombre de démonstrations expérimentales ont été réalisées pour des fréquences allant des micro-ondes au domaine terahertz. L'extension au spectre visible représente un enjeu majeur qui ne se borne pas à l'application d'une simple loi d'échelle sur les dimensions mises en jeu. En effet, les métamatériaux à indice négatif sont principalement constitués de métaux et leur réponse électromagnétique dépend fortement de la fréquence du fait de la dispersion et de l'absorption.

L'objet ce travail sera de relever les nombreux défis scientifiques du domaine et notamment de développer des modèles simples permettant de décrire de façon mésoscopique la réponse d'un métamatériau à indice négatif aux fréquences optiques.

Mots- clés : Simulation, nanophotonique, métamatériaux, électromagnétisme.

Abstract

Metamaterials are gaining momentum in recent years. The new properties allow to consider the development of new optical components for new applications. The "perfect lens", that is to say, not subject to the diffraction limit, is a typical example of an original component and very promising in terms of applications, based on the use of a metamaterial with negative refractive index.

This subject involves the study of metamaterials and their applications in the visible, in particular the simulation of a negative index of refraction. So far, a number of concepts have been established and a number of experimental demonstrations were performed for frequencies ranging from microwave to terahertz field. The extension to the visible spectrum is a major issue that does not confine itself to applying a simple scaling law on the dimensions set in. In fact, the negative index metamaterials consist mainly of metals and their response depends strongly on the electromagnetic frequency because of dispersion and absorption.

The purpose of this work will address the many challenges of scientific field and in particular to develop simple models to describe how the mesoscopic response of a negative index metamaterial at optical frequencies.

Keywords: Simulation, nanophotonics, metamaterials, electromagnetic