

III.1. Introduction :

La complexité de la fabrication et de la caractérisation des cristaux photoniques aux fréquences optiques rend coûteuses en temps et argent les études expérimentales systématiques sur des dispositifs des cristaux photoniques. Le développement des méthodes de modélisation optiques précises et rapides reste donc primordial pour l'étude de ces structures.

Les méthodes les plus citées dans la littérature pour l'étude des cristaux photoniques sont : méthode des ondes planes (PWE), méthode des différences finies temporelles (FDTD), méthode des matrices de transfert (MMT), méthode des matrices de diffraction et méthode des modes couplés. Parmi toutes ces méthodes, les plus répandues sont la méthode des ondes planes et la méthode FDTD, qui sont utilisées dans nos simulations. De plus certains simulateurs ont été conçus pour faciliter cette tâche. Parmi ces simulateurs on peut citer deux moteurs de simulations le FULL WAVE et le BandSolve de R soft CAD [2].

III.2. Méthodes de modélisation :

La modélisation électromagnétique des propriétés des cristaux photoniques nécessite en général un fort investissement en programmation et en analyse numérique. Parmi les modèles théoriques traitant des cristaux photoniques, on peut d'abord distinguer deux catégories: les cristaux de taille finie et infinie. On peut ensuite considérer la dimensionnalité des cristaux étudiés (1D, 2D ou 3D). Les principales techniques de calcul utilisées pour les cristaux finis sont les méthodes des matrices de transfert, les théories de la diffraction par les réseaux et les différences finies dans le domaine temporel (Finité Différence Time Domain, FDTD) [17]. Le calcul de structures infinies est généralement basé sur une méthode de décomposition du champ en ondes planes (Plane Wave Expansion, PWE) [5]. Dans le cadre de ce mémoire, nous présenterons les méthodes PWE et FDTD [41,6, 18].

III.2.1. La méthode des ondes planes :

La méthode de décomposition en ondes planes PWE (Plane Wave Expansion) s'est imposée comme l'un des outils de modélisation privilégié des cristaux photoniques [42-43] et figure, par ailleurs, parmi les premiers formalismes à avoir été employés afin de mettre théoriquement en évidence l'existence de bandes interdites photoniques. C'est une méthode

de résolution dans le domaine fréquentiel des équations de Maxwell. Elle est basée sur la décomposition en ondes planes du problème électromagnétique. Cette méthode est essentiellement utilisée pour analyser les propriétés dispersives des matériaux à bandes interdites photoniques et permet de déterminer la fréquence, la polarisation, la symétrie et la distribution du champ pour les modes d'une structure photonique [44].

III.2.2. La méthode FDTD (Finité Différence Time Domain) :

Elle a été proposée pour la première fois par Yee en 1966[42]. Cette méthode ne nécessite aucune hypothèse de départ sur la forme possible des solutions ou des ondes se propageant dans la structure, ce qui la rend indépendante de la géométrie du système à simuler. Un autre avantage réside dans sa faculté à couvrir un large spectre de fréquences avec une seule simulation en ayant recours à la transformée de fourrier. C'est une méthode numérique populaire et très répondu pour la résolution des problèmes de l'électromagnétisme, pouvant être appliquée aux milieux conducteurs comme elle peut être appliquée aux milieux diélectriques. Cette méthode est particulièrement intéressante pour connaître la réponse spectrale d'un système non nécessairement périodique et pour calculer les distributions de champ dans des structures de dimensions finies [17,18].L'inconvénient majeur de cette méthode, qui tend cependant à s'estomper avec les évolutions des capacités informatiques, est qu'elle exige des ressources de calculs importantes [45].

III.3. Présentation du logiciel R soft CAD :

III.3.1. Environnement de CAD :

Le R Soft CAD est un programme de base de RSoft Photonique, il permet aux chercheurs et ingénieurs de créer des systèmes pour la conception des différents dispositifs tels que : des guide d'ondes, des cavités résonantes, des circuits optiques et d'autres dispositifs photoniques. Il agit en tant que programme de gestion pour les modules passifs de simulation du dispositif de R Soft :

Beam PROP, FullWAVE, BandSOLVE, GratingMOD et DiffractMOD.

III.3.2. Le simulateur « bandsolve » :

Le logiciel que nous avons exploité pour modéliser les structures par la méthode des ondes planes s'appelle «BandSolve» développé par R soft.

BandSolve est un logiciel de simulation des structures de bande photoniques. Il est basé sur la méthode des ondes planes optimisée pour les structures périodiques, idéal pour produire des diagrammes de bande des structures bandes interdites photoniques classiques tels que 2D et 3D et les guides à cristaux photoniques en utilisant une méthode super cellule type onde plane. A deux dimensions, il est nécessaire de considérer deux directions de propagation différente : TE (avec le champ E perpendiculaire à l'axe des trous) et TM (où E est parallèle à l'axe des trous). Ces deux polarisations sont découplées et donnent lieu à deux diagrammes de bandes indépendants. Il n'existe pas forcément une bande interdite dans les deux cas. En outre, il peut être appliqué à des structures comme les fibres à cristaux photoniques, qui sont complexes pour les autres techniques de simulation. BandSolve est particulièrement utile pour optimiser les propriétés des structures à cristaux photoniques, qui sont simulés par la méthode FDTD implémentée dans le logiciel FullWave, pour examiner les propriétés dépendant du temps comme les pertes, et pour calculer les distributions de champ dans des structures de dimensions finies [46].

III.3.3. Présentation de Full Wave:

Les simulations numériques ont été effectuées avec le logiciel Fullwave qui est un logiciel de simulation électromagnétique, basé sur la méthode des différences finis dans le domaine temporel. La méthode FDTD repose sur la résolution des équations de Maxwell dans un domaine discrétisé spatialement et temporellement. Il permet de suivre l'évolution du champ EM au cours du temps en tout point de la structure. On peut ainsi obtenir les cartographies du champ EM à n'importe quel endroit et n'importe quel moment. La connaissance de l'évolution du champ en fonction du temps permet également d'obtenir des informations sur la réponse spectrale de la structure.

Ce logiciel peut simuler des structures (limitées, infinies ou périodiques), formées par différents matériaux qui peuvent être métalliques ou diélectriques. L'utilisation de Fullwave nécessite de définir les matériaux qui composent la structure à l'aide de la permittivité électrique. Il faut aussi définir l'environnement de la structure et donc les conditions aux limites. Pour cela il faut disposer de conditions absorbantes aux abords du

domaine de discrétisation (calcul) qui permet d'éviter les réflexions parasites engendrées aux bords de la fenêtre du calcul FDTD afin de simuler un milieu ouvert [47].

III.4. Les étapes de simulation d'un guide d'onde:

La fenêtre de programme de R soft CAD comporte une barre de menus en haut de la fenêtre, une barre des outils qui porte plusieurs icônes et la ligne d'état (voir figure III.01).

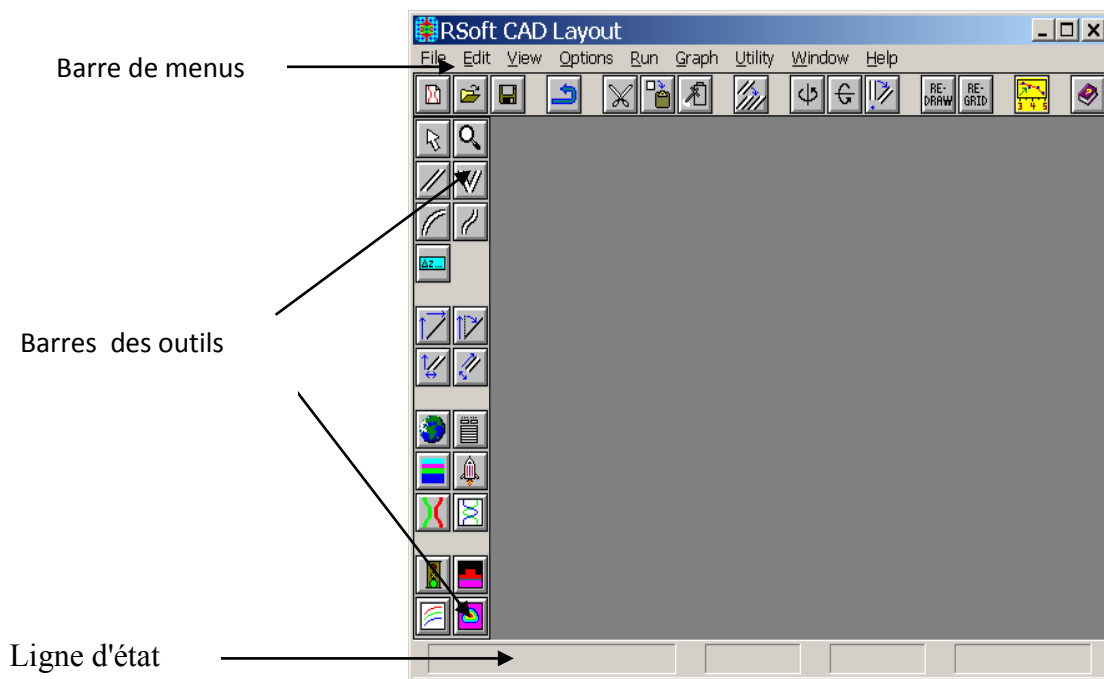



Figure III.01: Fenêtre principale du programme CAD [16]

III.4.1. Créer un nouveau circuit :

Pour créer un nouveau circuit on va cliquer sur l'icône New circuit  dans la barre d'outils supérieure. Alternativement, nous allons choisir File /New du menu. Le dialogue de démarrage de la figure III.02 va apparaître.

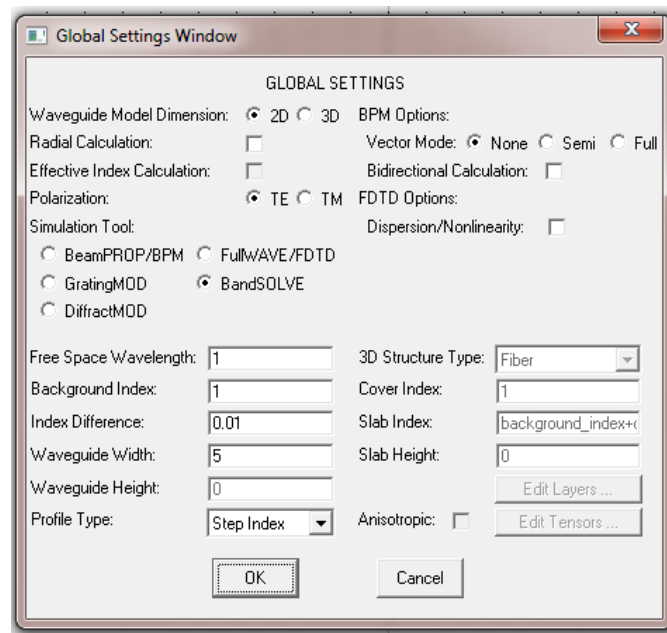


Figure III.02: La fenêtre de démarrage (startup Windows) [16]

Il faut remplir la différence d'indice (Index différence), qui est la différence d'indice par défaut entre la couche guidant et l'indice de substrat (Background index), d'autre part, il faut choisir le type de la polarisation (Mode TE ou Mode TM). On peut aussi par cette option choisir le module de simulation parmi les six modules existants dans le logiciel R Soft bandSOLVE, FullWave, BeamPROP/BPM ou GratingMOD. Après l'introduction des informations dans la fenêtre de démarrage on va cliquer sur OK pour obtenir la fenêtre de la figure III.03.

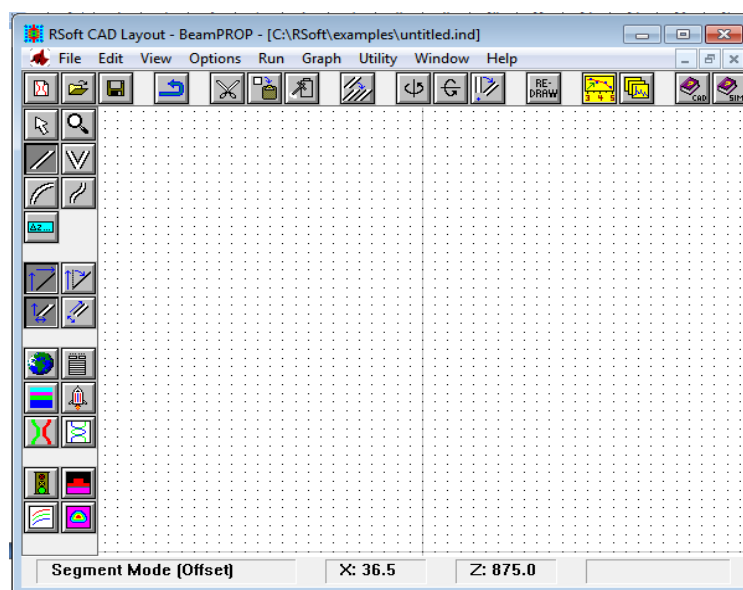


Figure III.03: Nouvelle fenêtre pour réaliser un nouveau composant ou nouveau circuit.

III.4.2. Générer la structure de réseau :

Dans cette partie on va montrer comment créer un réseau en cristaux photoniques dans l'interface de CAD. Généralement, il existe plusieurs manières pour créer une structure de réseau dans l'interface de CAD. Cependant, la manière la plus facile est d'employer un des multiples utilités de disposition qui sont incluse avec Full WAVE afin d'expédier la création de ce réseau en utilisant Array Lay-out XZ (figure III.04).

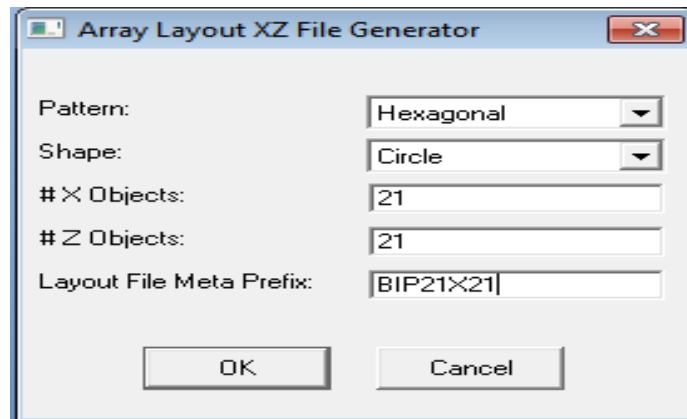


Figure III.04: Arrangements de disposition de la rangée XZ [16].

Après l'introduction des différentes données (type de réseau, forme de motif, le nombre de rangés et le nom du circuit) on clique sur le bouton **OK** pour obtenir la structure du cristal photonique qui apparaît sur la figure III.05.

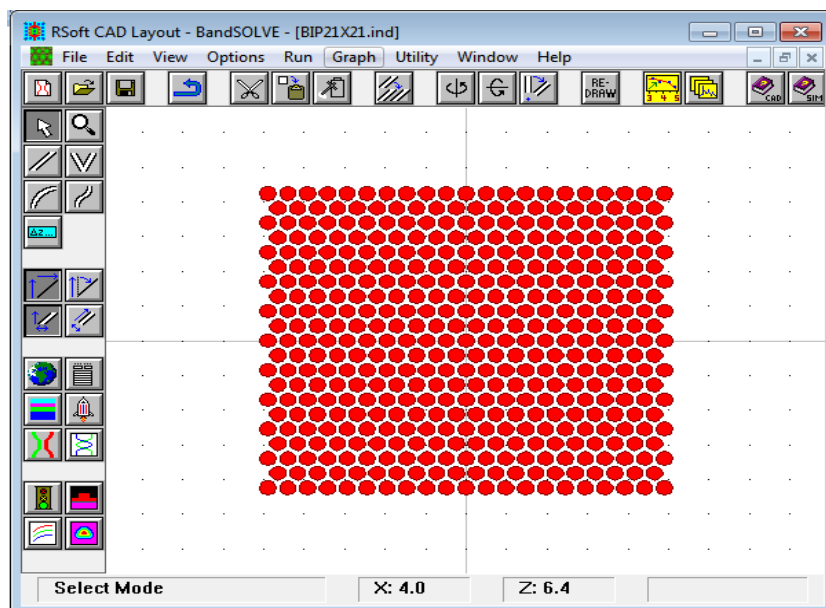



Figure III.05: Disposition de rangée dans la fenêtre de CAD.

III.4.3. Régler les paramètres globales :

Pour définir les propriétés du réseau tels que l'indice de réfraction, la polarisation et pour choisir le module de simulation Full WAVE/ BandSolve parmi les autres modules existents à RSoft on clique sur l'icône  (global setting). La fenêtre de dialogue ci-dessous apparaît (Figure III. 06).

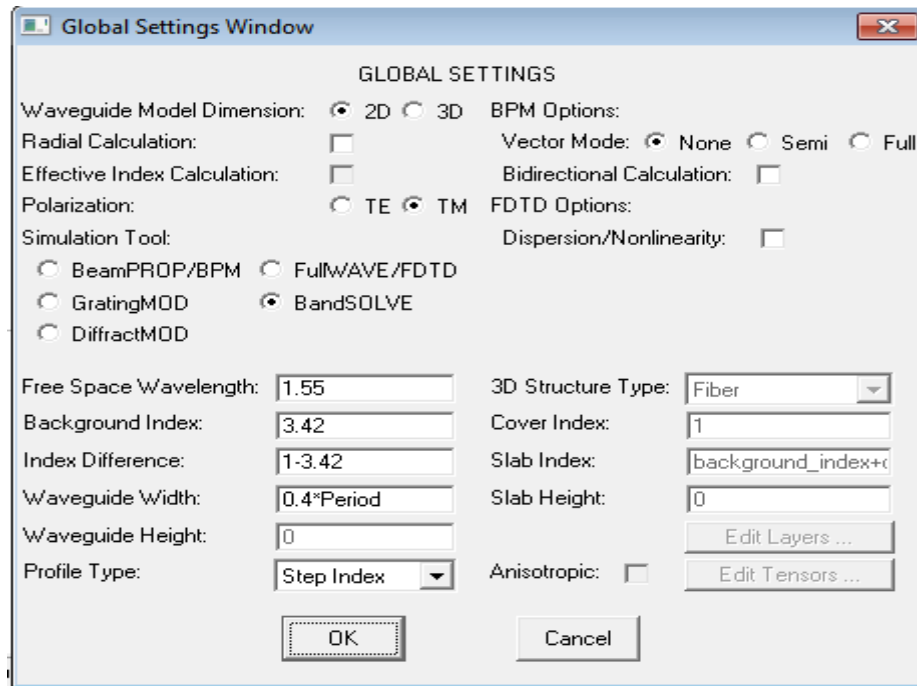



Figure III.06: Fenêtre des paramètres globales du circuit [16]

III.4.4. Définition des variables :

Cliquer sur l'icône  (Edit symboles) dans la fenêtre de CAD, le tableau de symbole (Table editor) s'ouvre (Figure III.07). Ce tableau de symboles permet à l'utilisateur de créer ou modifier à la fois et intégrer les variables définies par l'utilisateur, ces variables peuvent être utilisées pour définir pratiquement n'importe quel paramètre de la structure (le rayon, la période, l'indice de réfraction, nombre de rangés).

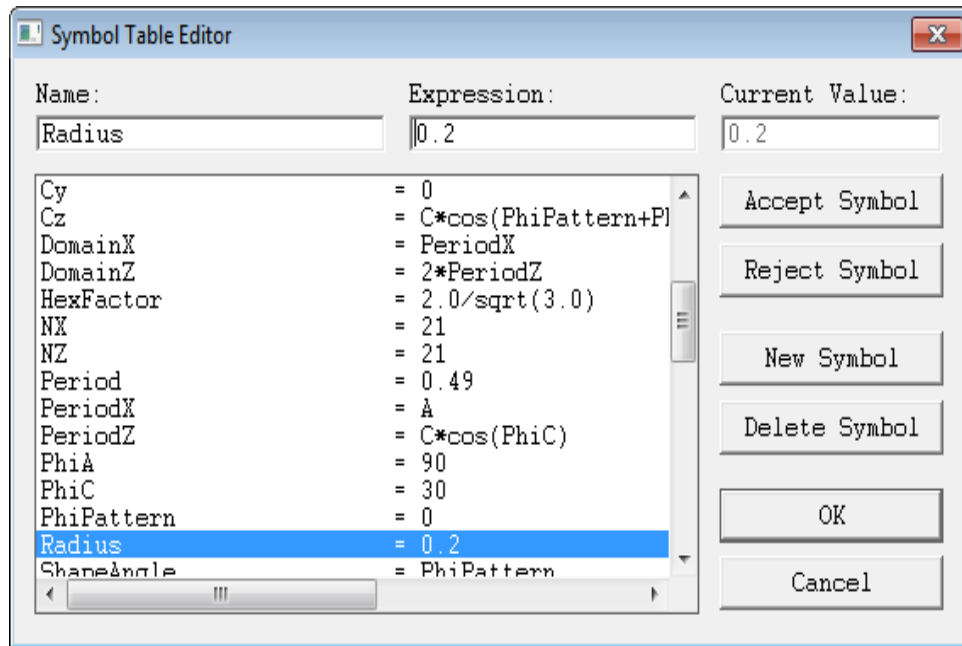
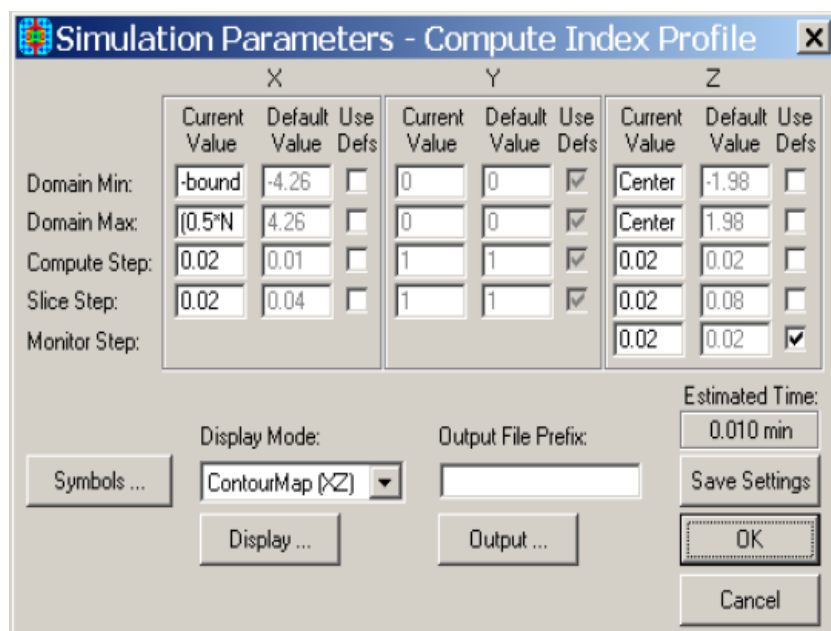


Figure III.07: L'éditeur du Tableau de symboles [16]

Ces symboles correspondent aux arrangements faits dans le nouveau circuit (New Circuit) de la boîte de dialogue ci-dessus. Pour définir un nouveau symbole (par exemple Nhole=1), on clique sur new symbole puis on va entrer le nom et la valeur du symbole.

III.4.5. Vérifier la structure :

Pour vérifier notre structure, nous avons simulé le profile de l'indice de réfraction dans le plan XZ



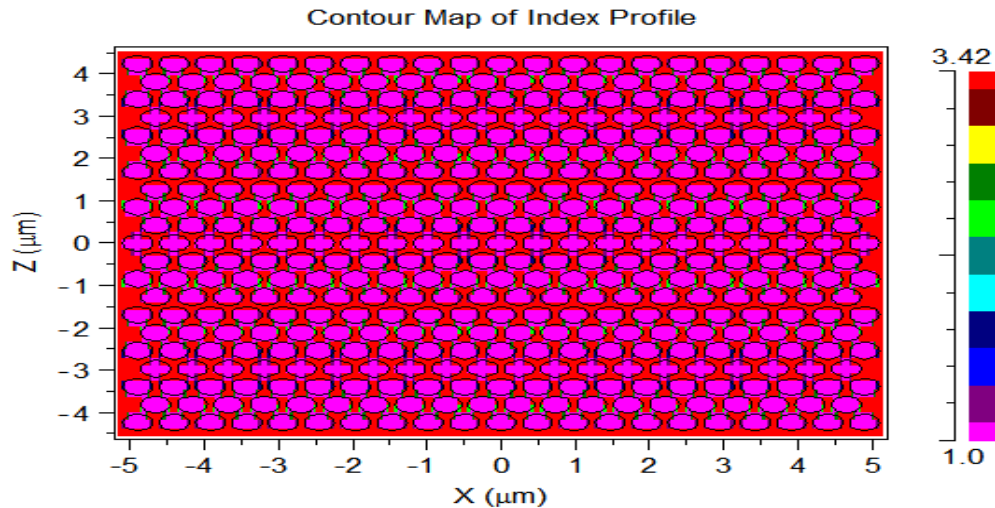


Figure III.08: Profil d'indice de la structure à cristaux photoniques 2D

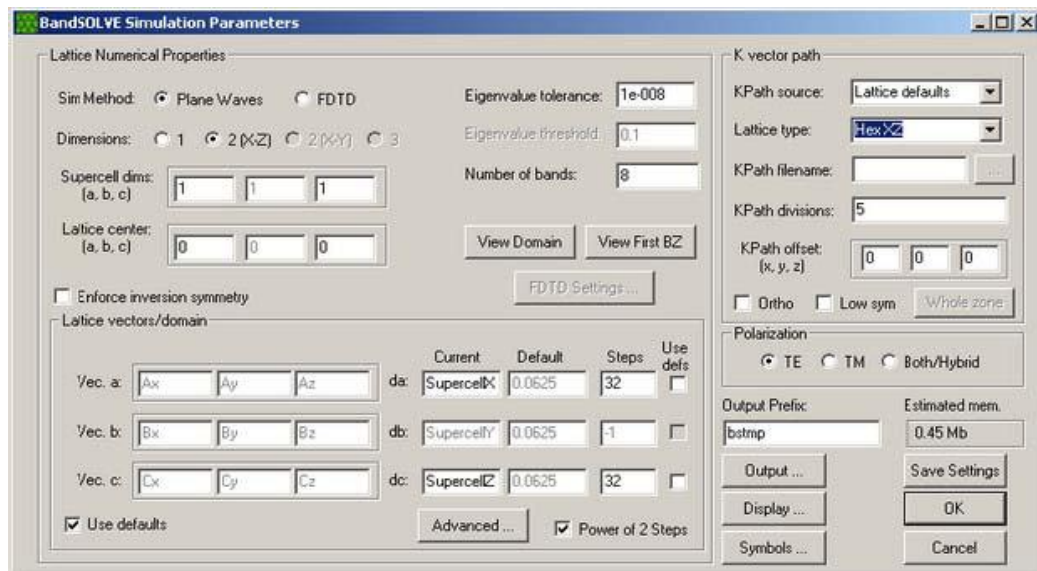


Figure III.09: La fenêtre de paramètres de simulation de BandSolve où des paramètres numériques de base de simulation sont entrés [16].

III.5. Diagramme des bandes :

Comme indiqué dans le premier chapitre, les zones de Brillouin aide à la localisation et l'optimisation des bandes interdites, puis le calcul de la dispersion des modes de défaut. Seulement il est nécessaire d'analyser un petit nombre de points dans la première zone de Brillouin, la figure III.10 montre le diagramme des bandes correspondant à la structure de la fibre en cristaux photoniques (FCP) pour les modes TE/TM.

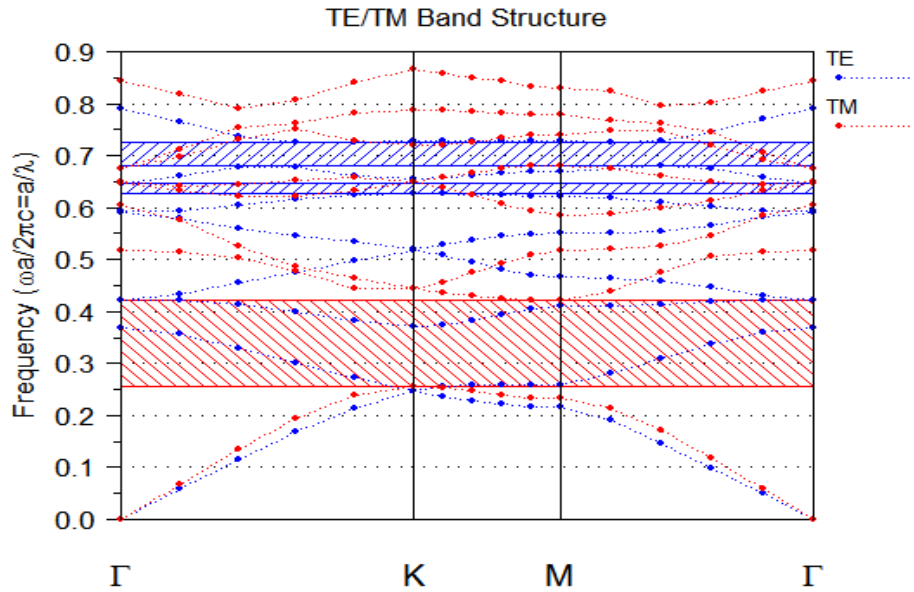


Figure III.10: Diagramme des bandes pour les modes TE et TM dans la structure FCP

On constate que les bandes des modes TE et TM dans le diagramme sont toutes reliés, cela signifie qu'il n'y a aucune bande interdite photoniques qui empêche la propagation des ondes. Cette propriété est due à la faible valeur de l'indice des trous par apport à l'indice de la couche guidante, donc l'onde se propage dans la zone d'indice le plus élevé de la bande interdite [24].

III.6. création d'un guide d'onde droit :

Pour créer un guide droit de largeur $W1$ suivant une direction ΓK ou ΓM , il suffit d'enlever un rangé de trous d'air selon la direction choisie (voir figure III.11).

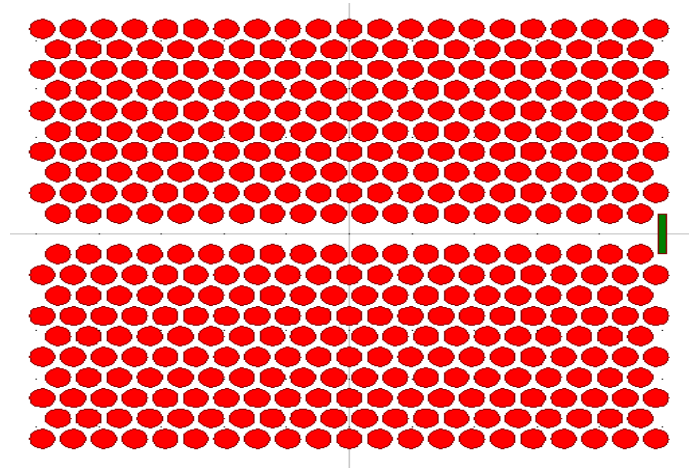



Figure III.11 : un guide d'onde droit $W1$

III.6.1. Réglage des paramètres de simulation :

Pour le choix et le réglage des paramètres de simulation on clique sur le Bouton . Par conséquent, il apparaît la fenêtre correspondante au module de simulation utilisé (BandSolve/FullWave) comme il est représenté sur la figure III.09 ou sur la figure III.12 respectivement. Une fois que les paramètres numériques et d'autres options sont acceptables, on clique sur **OK** pour commencer la simulation.

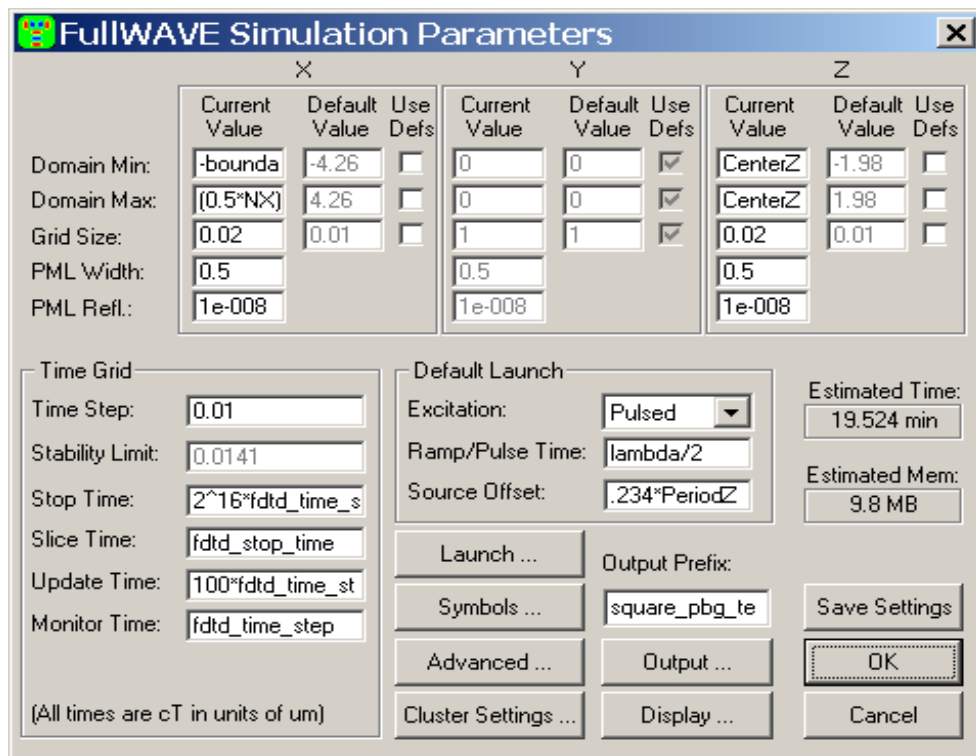



Figure III.12: La fenêtre de paramètres de simulation de Full WAVE où des paramètres numériques de base de simulation sont entrés [17].

III.6.2. Lecture des résultats :

Afin de regarder ou imprimer les résultats de simulation, on clique sur l'icône  de WinPLOT dans la barre des outils supérieur de la fenêtre de CAD, et on choisi le graphe désiré à partir du dialogue qui est présenté.

III.7. Exemple de calcul de mode pour la guide droit W1 :

Nous considérons dans cette section un guide d'onde à cristaux photoniques. Le cristal photonique est un réseau triangulaire de trous d'air de périodicité $a = 370\text{nm}$, percés dans une membrane de Si d'indice $n = 3.42$ et de rayon des trous $r = 0.12\mu\text{m}$. Le guide d'onde est formé en enlevant une rangée de trous dans la direction ΓK du réseau triangulaire. Il y a 7 rangées de trous de part et d'autre de la rangée manquante et 15 rangées de trous suivant l'axe de propagation (Figure III.13(a)). Le but de cette étude est d'obtenir une cartographie à haute résolution de la propagation dans le guide droit W1.

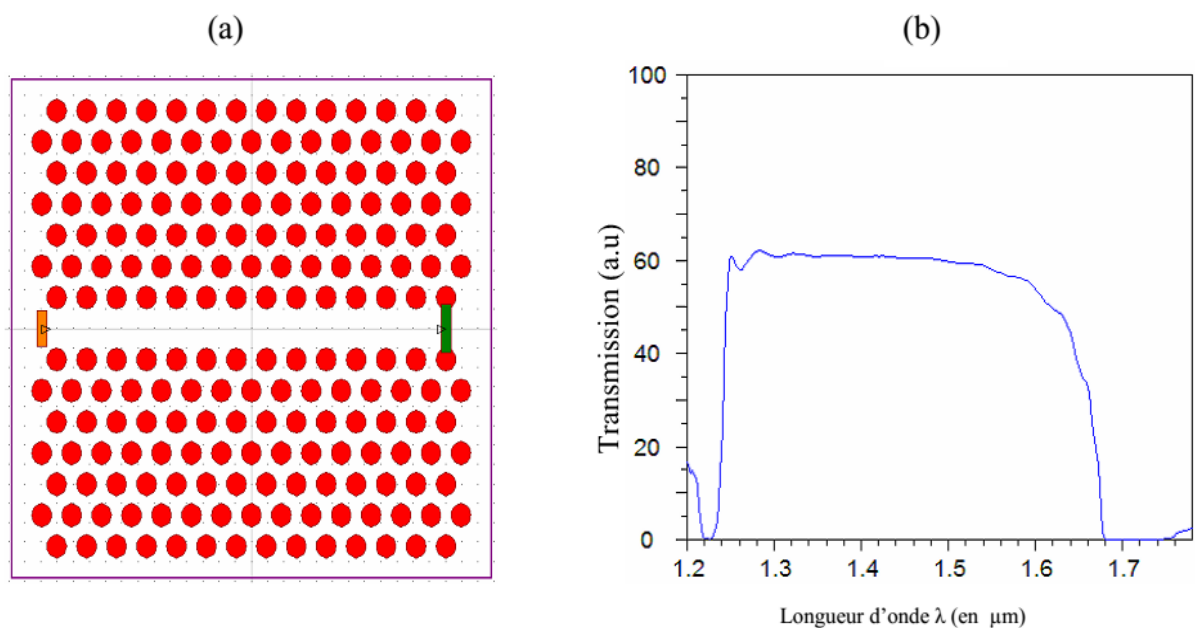


Figure III.13: (a)Guide droit référence W1 (Une rangée de trous omise) réalisé dans un cristal photonique triangulaire de trous d'air sur une membrane de Si suivant la direction ΓK .(b)Spectre de transmission guide droit référence W1 en mode TE.

Un calcul FDTD fait par le logiciel FullWave de RSoft, permet de tracer le spectre de transmission (Figure III.13(b)), une large transmission du guide droit W1 est observée s'étalant sur plus de 490nm et elle est de 64%. On s'est limité dans ce cas à la région spectrale de la bande interdite du cristal 2D calculée précédemment. L'enjeu principal de ces guides d'ondes concerne les pertes. Quand on augmente le nombre de rangées horizontales, les pertes de propagation augmentent. Les cristaux photoniques de part et d'autre la ligne de défauts sont identiques et jouent le rôle de miroirs réfléchissants, lorsque le nombre N de rangées de trous de part et d'autre du défaut est infini, la lumière est réellement guidée et se propage le long du défaut sans être atténuée [48, 6].

La Figure III.14 représente la distribution spatiale d'une excitation de type continue (CW) à une longueur d'onde de $1.5\mu\text{m}$ (longueur d'onde permise) pour la polarisation TE du guide droit W1. Nous constatons que le champ est bien confiné et l'allure de sa distribution démontre clairement l'existence du phénomène de guidage de la lumière le long du guide W1 [2].

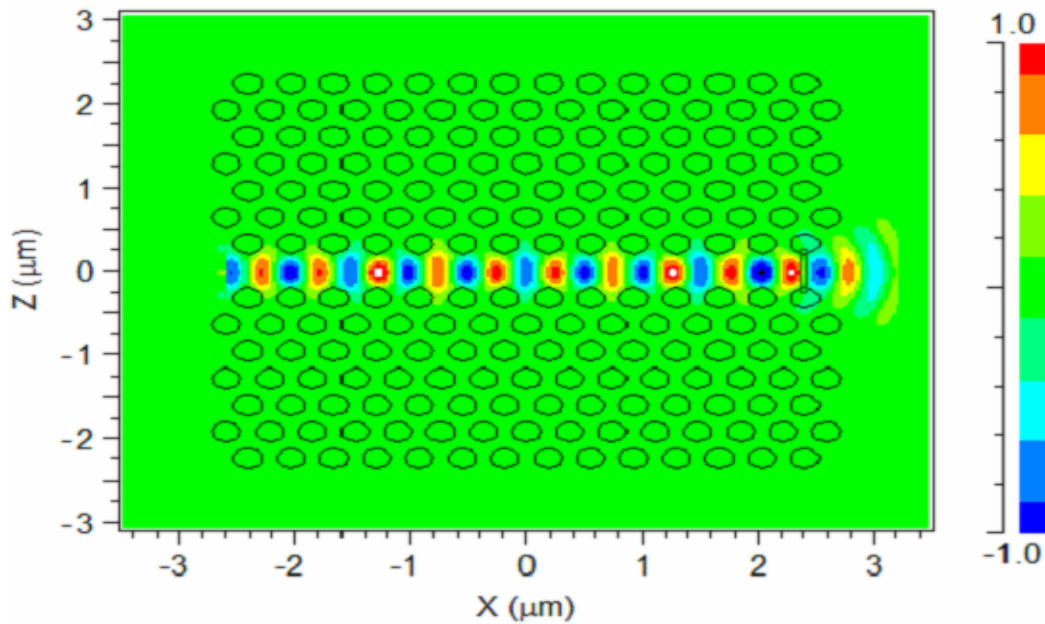


Figure III.14: Distribution spatiale du champ à la suite d'une simulation de type FDTD et une excitation de type CW du guide droit référence W1, pour une polarisation TE à $\lambda=1.55\mu\text{m}$.

III.8. Conclusion :

La méthode des ondes planes était la première utilisée pour calculer les structures de bande d'énergie des structures diélectriques. Cette technique de résolution dans le domaine fréquentiel consiste à développer le champ électromagnétique sur une base d'ondes planes. La méthode des différences finies dans le domaine temporel (FDTD) a aussi eu beaucoup de succès pour la modélisation de ce type de matériaux grâce à sa facilité d'implémentation. Cependant, elle est plus utilisée pour le calcul des diagrammes de transmission et de réflexion.

Dans ce chapitre, nous avons présenté les deux méthodes de simulation : la méthode des ondes planes (PWM) et la méthode des différences finies dans le domaine temporel (FDTD). Ensuite, nous avons décrit les deux modules de simulation le Bandsolve et le Fullwave de Rsoft CAD que nous avons utilisé au cours du troisième chapitre de ce manuscrit. Par ailleurs, nous avons décrit les étapes de simulation pour le calcul des modes guidés dans un guide d'onde à cristaux photoniques bidimensionnels de type W1 prise comme exemple.