

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة سعد دحلب البليدة
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك
Département d'Électronique



Mémoire de projet de fin d'Études

présenté par

KEBICHI Amina

&

LOUNOUGHFI Fatima

Pour l'obtention du diplôme Master en Électronique option Micro
Optoélectronique

Étude et Simulation des Guides Optiques

Proposé par : Mr NACER Said

Année Universitaire 2015-2016

Dédicace :

Je dédie ce mémoire

A mes parents pour leur amour inestimable, leur confiance, leur soutien, leurs sacrifices et toutes les valeurs qu'ils ont su m'inculquer.

A ma grand-mère AICHA pour sa douceur et sa gentillesse.

A mes sœurs Asma et Hasna pour leur tendresse leur complicité et leur présence.

A mes deux tantes et mes oncles pour toute l'affection qu'ils m'ont donnée et pour leurs précieux encouragements.

A mon ami Hichem et mes chères copines Nesrine et Wafa et à tous mes amis sans oublier mon binôme Fatima avec lequel j'ai partagée des moments de joie et de peur.

Et à tous ceux que ma réussite leur tient à cœur.



Amina

Dédicace :

Je dédie ce modeste travail à ceux qui me sont chers, je cite en premier lieu

Mes irremplaçables parents :

Ma mère, qui a œuvré pour ma réussite, de par son amour, son soutien, tous les sacrifices consentis et ses précieux conseils, pour toute son assistance et sa présence dans ma vie.

Mon père, pour m'aider à avancer dans la vie, Merci pour les valeurs nobles, l'éducation et le soutien permanent venu de toi.

À mon adorable sœur Zineb, et mon chère frère Moncef.

À ma nièce Malak.

À ma copine Ahlem et mon binôme Amina.

À toute ma famille et à tous mes amis (es) sans exception.

À tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la

Réalisation de ce travail.

À moi-même et à tous ceux qui m'aime.



Fatima

Remerciements

A dieu tout Grace

Pour nous avoir guidé et honoré par la lumière et la compréhension et de nous avoir accordé la connaissance de la science. Louange à Dieu tout puissant qui nous a donné santé et courage pour achever ce modeste travail.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à Mr NACER Said pour sa supervision à ce travail, nous le remercions infiniment pour sa rigueur, sa simplicité, sa générosité et sa disponibilité durant la réalisation de ce travail. Ces conseils précieux nous ont permis de réaliser notre mémoire de fin d'étude.

Nos remerciements les plus vifs s'adressent aussi à Monsieur le président et les membres du jury qui ont accepté d'examiner et d'évaluer notre travail.

Nos remerciements s'adressent à tout enseignant ayant contribué à notre formations depuis notre premier cycle au primaire jusqu'au dernier cycle à l'université.

Merci à toutes les personnes qui nous ont aidé de près ou de loin à réaliser ce mémoire.

ملخص: ان عملنا هذا يتمثل في دراسة موجه للضوء ذو بعد واحد ثم ذو بعدين لغرض التوصل الى طريقة نموذجية لتحديد مختلف خصائص هذا الموجه.

عدة طرق تعتمد على الحساب الرقمي (طريقة القرينة الفعالة، طريقة مصفوفات التحول، طريقة الفروق المنتهية) تم عرضهم، وبرنامجين حاسوبيين تم استعمالهما (ماتكاد و كومصول) من اجل المحاكاة البصرية لموجه الضوء اللذان يسمحان انطلاقا من خلال المعطيات الخاصة بالموجه بتحديد القرنية الفعالة و عامل التحديد.

كلمات المفاتيح: موجه للضوء، طريقة القرينة الفعالة، طريقة مصفوفات التحول، طريقة الفروق المنتهية.

Résumé : Notre travail consiste en l'étude d'un guide optique à une dimension puis à deux dimensions pour parvenir à une méthodologie de détermination des différentes caractéristiques du guide.

Des méthodes de calcul numériques (Méthode de l'indice effectif, Méthode des matrices de transfert, Méthode des éléments finis) ont été présentées, et deux logiciels ont été utilisés (Mathcad et Comsol) pour la simulation des guides optiques qui permettent à partir des données du guide de déterminer l'indice effectif et le facteur de confinement.

Mots clés : Guide optique, Méthode d'indice effectif, Méthode des matrices de transfert, Méthode des éléments finis.

Abstract : Our work consist to study the one dimensional and tow-dimentional optical waveguides, so that we arrive to the methodology of determination of the guide's different features.

Numerical methods of calculation (Effctive Index Method, Transfer Matrices Method, Finit Element Methode,) were presented, and tow softwar were used (Matchad and Comsol) for the optical simulation of the guides which make it possible starting from the data of the guide to determine the effective index and the factor of containment.

Keywords : Waveguide optique, Effctive Index Method, Transfer Matrices Method, Finit Element Methode.

Listes des acronymes et abréviations

OEM : Onde électromagnétique.

TE : Transverse électrique.

TM : Transverse magnétique.

M.I.E : Méthode de l'indice effectif.

M.M.F : Méthode des matrices de transfert.

M.E.F : Méthode des éléments finis.

Liste des symboles

∇ : Opérateur gradient.

E : Champ électrique.

H : Champ magnétique.

B : Induction magnétique.

ρ : Densité de charge.

μ : Perméabilité magnétique.

\mathcal{E} : Permittivité magnétique.

μ_0 : Perméabilité du vide

μ_r : Perméabilité relative du milieu.

\mathcal{E}_0 : Permittivité du vide.

\mathcal{E}_r : Permittivité relative du milieu.

W : Energie du photon.

h : Constante de planck.

f : Fréquence de la lumière.

J : Densité du courant électrique.

ω : Vitesse angulaire.

π : Rapport de la superficie d'un cercle au carré de son rayon.

β : Constante de propagation.

E_0 : Vecteur de champ électrique.

H_0 : Vecteur de champ magnétique.

c : Vitesse de la lumière dans le vide.

v : Vitesse de l'onde.

n : Indice de réfraction du milieu.

λ : Longueur d'onde.

k_0 : Vecteur d'onde dans le vide.

n_{eff} : Indice effectif.

Γ : Facteur de confinement.

N : Nombre de couche.

E_x, E_y, E_z : Composantes transverses cartésiennes du vecteur champ électrique.

H_x, H_y, H_z : Composantes transverses cartésiennes du vecteur champ magnétique.

Table des matières

Introduction générale.....	1
Chapitre 1 : Généralités sur les guides optiques.....	3
1.1 Introduction.....	3
1.2 Ondes électromagnétiques.....	3
1.2.1 Théorie électromagnétique de la lumière.....	3
1.2.2 Equation de Maxwell.....	5
1.2.3 Equation d'onde.....	6
1.3 Théorie des guides optiques.....	8
1.3.1 Modes des guides optiques.....	8
1.3.2 Guide optique planaire.....	9
1.3.3 Guide bidimensionnel.....	10
1.3.4 Guide optique rectangulaire.....	10
a Guide Burid Channel.....	11
b Guide Rib.....	11
c Guide Ridge.....	12
1.3.5 Notion d'indice effectif	12
1.3.6 Facteur de confinement	12
1.4 Conclusion.....	13
Chapitre 2 : Guides optiques à une dimension	14
2.1 Introduction	14
2.2 Théorie	15
2.2.1 Guide optique plan à trois couches.....	15
a Méthode de l'indice effectif à une dimension	15
❖ Résolution en mode TE.....	16
❖ Résolution en mode TM.....	18
2.2.2 Guide optique plan à N couches.....	21
a Définition	21
b Méthode des matrices de transfert	21
2.3 Simulations.....	24
2.3.1 Description des logiciels utilisés.....	24
a Le logiciel Matchad.....	24
b Le logiciel Comsol.....	24

2.3.2	Résultats de la simulation des guides optiques plans à trois couches.....	25
a	Guide asymétrique.....	25
❖	Résolution en mode TE.....	25
❖	Résolution en mode TM.....	30
b	Guide symétrique.....	35
❖	Résolution en mode TE.....	35
❖	Résolution en mode TM.....	40
2.3.3	Résultats de la simulation de guide optique 1D à cinq couches.....	44
2.4	Interprétation des résultats.....	45
2.5	Conclusion.....	46
	Chapitre 3 : Guides optiques à deux dimensions.....	47
3.1	Introduction.....	47
3.2	Théorie.....	47
3.2.1	Définition.....	47
3.2.2	Méthode de l'indice effectif à deux dimensions	48
3.3	Simulations..... ;.....	51
3.3.1	Méthode des éléments finis à deux dimensions.....	51
3.3.2	Résultats des simulations.....	52
a	Guide optique rectangulaire à deux dimensions (Rib) à bas <i>Si/SiO₂</i>	52
b	Comparaison entre trois guides 2D (Buried Channel, Rib , Ridge).....	54
3.4	Interprétation des résultats.....	58
3.5	Conclusion.....	59
	Conclusion générale.....	60
	Bibliographie.....	62

Liste des figures

Figure 1.1. Représentation graphique d'un guide d'onde planaire	9
Figure 1.2. Représentation graphique d'un guide d'onde rectangulaire.....	10
Figure 1.3. Guide Buried Channel.....	11
Figure 1.4. Guide Rib.....	11
Figure 1.5. Guide Ridge.....	12
Figure 2.1. Guide optique plan à 3 couches.....	15
Figure 2.2. Guide plan à N couches.....	21
Figure 2.3. Section de guide optique plan à trois couches.....	25
Figure 2.4. Répartition du champ électrique E_y dans un guide asymétrique 1D à trois couches en mode TE.....	26
Figure 2.5. Variation de l'indice effectif en fonction de l'épaisseur d de la couche guidante.....	26
Figure 2.6. Variation de l'indice effectif en fonction de l'indice de réfraction n_2 de la couche guidante.....	27
Figure 2.7. Variation de l'indice effectif en fonction de la longueur d'onde λ	27
Figure 2.8. Variation du facteur de confinement Γ en fonction de l'épaisseur de la couche guidante.....	28
Figure 2.9. Variation du facteur de confinement Γ en fonction de l'indice de réfraction n_2 de la couche guidante.....	29
Figure 2.10. Variation du facteur de confinement Γ en fonction de la longueur d'onde λ	29
Figure 2.11. Répartition du champ magnétique H_y dans un guide asymétrique 1D à trois couches en mode TM.....	30
Figure 2.12. Variation de l'indice effectif en fonction de l'épaisseur d de la couche guidante.....	31
Figure 2.13. Variation de l'indice effectif en fonction de l'indice de réfraction n_2 de la couche guidante.....	31
Figure 2.14. Variation de l'indice effectif en fonction de la longueur d'onde λ	32
Figure 2.15. Variation du facteur de confinement Γ en fonction de l'épaisseur de la couche guidante n_2	33

Figure 2.16. Variation du facteur de confinement Γ en fonction de l'indice de réfraction n_2 de la couche guidante	33
Figure 2.17. Variation du facteur de confinement Γ en fonction de la longueur d'onde λ	34
Figure 2.18. Répartition du champ électrique E_y dans un guide symétrique 1D à trois couches en mode TE.....	35
Figure 2.19. Variation de l'indice effectif en fonction de l'épaisseur d de la couche guidante.....	36
Figure 2.20. Variation de l'indice effectif en fonction de l'indice de réfraction de la couche guidante n_2	36
Figure 2.21. Variation de l'indice effectif en fonction de la longueur d'onde λ	37
Figure 2.22. Variation du facteur de confinement Γ en fonction de l'épaisseur d de la couche guidante.....	38
Figure 2.23. Variation du facteur de confinement Γ en fonction de l'indice de réfraction n_2 de la couche guidante.....	38
Figure 2.24. Variation du facteur de confinement Γ en fonction de la longueur d'onde λ	39
Figure 2.25. Répartition du champ électrique H_y dans un guide symétrique 1D à trois couches en mode TM.....	40
Figure 2.26. Variation de l'indice effectif en fonction de l'épaisseur d de la couche guidante.....	40
Figure 2.27. Variation de l'indice effectif n_{eff} en fonction de l'indice de réfraction n_2 de la couche guidante.....	41
Figure 2.28. Variation de l'indice effectif n_{eff} en fonction de la longueur d'onde λ	41
Figure 2.29. Variation du facteur de confinement Γ de l'épaisseur d de la couche guidante.....	42
Figure 2.30. Variation du facteur de confinement Γ en fonction de l'indice de réfraction n_2 de la couche guidante.....	43
Figure 2.31. Variation de facteur du confinement Γ en fonction de la longueur d'onde λ	43
Figure 2.32. Structure du guide optique à cinq couches.....	44
Figure 2.33. Variation de l'indice effectif n_{eff} en fonction de l'épaisseur d de la couche guidante.....	45

Figure 3.1. Guide rectangulaire.....	48
Figure 3.2. Concept de la méthode de l'indice effectif à deux dimensions	50
Figure 3.3. Guide Rib à base de Si/SiO ₂	52
Figure 3.4. Variation de l'indice effectif en fonction de la hauteur h	52
Figure 3.5. Variation de l'indice effectif en fonction de la largeur w	53
Figure 3.6. Variation du facteur de confinement en fonction de la hauteur h	53
Figure 3.7. Variation du facteur de confinement en fonction de la largeur w	54
Figure 3.8. Structures des trois guides.....	55
Figure 3.9. Répartition du champ électrique dans le guide Buried Channel.....	56
Figure 3.10. Répartition du champ électrique dans le guide Rib.....	56
Figure 3.11. Répartition du champ électrique dans le guide Ridge.....	57
Figure 3.12. Variation de l'indice effectif en fonction de h et w dans les 3 structures.....	57
Figure 3.13. Variation du facteur de confinement en fonction de h et w dans les 3 structures.....	58

Liste des tableaux

Tableau 2.1. Variation de l'indice effectif en mode TE.....	28
Tableau 2.2. Variation du facteur de confinement en mode TE.....	30
Tableau 2.3. Variation de l'indice effectif en mode TM.....	32
Tableau 2.4. Variation du facteur de confinement en mode TM.....	34
Tableau 2.5. Variation de l'indice effectif en mode TE.....	37
Tableau 2.6. Variation du facteur de confinement en mode TE.....	39
Tableau 2.7. Variation du l'indice effectif en mode TM.....	42
Tableau 2.8. Variation du facteur de confinement en mode TM.....	44
Tableau 3.1. Paramètres des trois guides.....	55

Introduction générale

L'optique guidée est une discipline très étudiée depuis la fin de la seconde guerre mondiale. Les recherches, dopées en partie par un contexte de guerre froide, ont abouti à la réalisation de solutions de guidage de la lumière et de composants optoélectroniques. C'est avant tout une histoire de matériaux capables de guider et de modifier les propriétés des ondes lumineuses [1].

En 1893 Joseph John Thomson a proposé le premier guide d'onde, qui a été vérifié par Olivier Lodge en 1894.

La technologie pour la conception des guides d'ondes optiques est très pointue et fait très largement appel à des matériaux nouveaux. Le besoin en méthodes numériques dans ce domaine est croissant [2].

L'avènement dans l'industrie de l'ordinateur et ses évolutions révolutionnaires ont complètement modifié les méthodes de production en raccourcissant les temps de développement et en s'affranchissant des tâches répétitives et fastidieuses pour laisser aux concepteurs les travaux les plus créatifs. De nouvelles techniques assistées par ordinateurs sont apparues, prenant le pas sur les méthodes traditionnelles et manuelles ; Elles permettent à la fois d'avoir une vue du produit fini, de le modifier le cas échéant, et simuler son fonctionnement avant sa réalisation effective. Elles permettent encore de générer les programmes avant sa réalisation effective. Elles permettent encore de générer les programmes nécessaires assurant la réalisation de plusieurs phases complexes de plus en plus spécialisées [3].

A la suite de cet effort de recherche important, les champs d'applications classiques tels que télécommunications par fibres optique, télémétrie, spectrométrie, ont été élargis par de nouveaux domaines comme le disque compact, le vidéodisque, les imprimantes laser et les télécommunications optiques spatiales à longue distance entre satellites [3].

Dans les guides d'onde optiques, d'une part la taille transverse des guides est le plus souvent de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde optique, et d'autre part des questions

de polarisation de la lumière se posent à propos des conditions aux frontières suivies par l'onde optique [4]. C'est dans ce contexte que se situe notre travail qui consiste en l'étude et la simulation des guides optiques.

Ce mémoire est présenté comme suit :

Le premier chapitre est un bref rappel sur les généralités des guides optiques, nous présenterons la théorie des ondes électromagnétiques, puis la théorie des guides optiques.

Le deuxième chapitre de ce mémoire est consacré à des études unidimensionnelles des guides optiques plans à trois couches et à N couches, ainsi qu'à des simulations d'exemples sur ces deux derniers, en utilisant des méthodes de résolutions numériques, méthode de l'indice effectif à une dimension, méthode des matrices de transfert, méthode des éléments finis.

Le troisième chapitre présente une étude bidimensionnelle des guides optiques rectangulaires et une simulation de quelques exemples avec les méthodes numériques suivantes : méthode de l'indice effectif à deux dimensions, et méthode des éléments finis.

Enfin, nous terminons par une conclusion.

Chapitre 1 Généralités sur les guides optiques

1.1 Introduction :

Nous allons présenter dans ce chapitre, dans un premier temps, un rappel sur les ondes électromagnétiques et le guidage de la lumière. Ensuite, des généralités sur les guides optiques seront exposées, telles que : la théorie des guides optiques, les modes de propagation, le guide d'onde planaire, le guide d'onde rectangulaire, notion de l'indice effectif, facteur de confinement, etc...

1.2 Ondes électromagnétiques :

1.2.1 Théorie électromagnétique de la lumière :

Certains physiciens ont proposé que la lumière était en fait une onde. Cette affirmation était corroborée par certains phénomènes comme la diffraction et l'interférence. La théorie ondulatoire de la lumière a longtemps été contestée car, selon certains, une onde a besoin d'un support matériel pour se propager (comme les ondes sonores qui doivent se propager dans de la matière). C'est alors que la notion d'éther a été introduite pour contrer ce problème. L'existence d'une telle substance n'a cependant jamais pu être démontrée [5].

La théorie ondulatoire de la lumière a gagné ses lettres de noblesse lorsque le physicien JAMES CLERK MAXWELL associa la lumière à un phénomène électromagnétique. Ainsi, la lumière étant une onde électromagnétique, elle n'avait pas besoin d'un milieu dans lequel se propager. Elle pouvait très bien se déplacer dans le vide [5].

D'après la théorie électromagnétique de la lumière, une onde lumineuse est constituée de la superposition d'un champ électrique et d'un champ magnétique oscillant dans le temps avec une fréquence f et se déplaçant, dans le vide, à une vitesse c [5].

La découverte de l'effet photoélectrique, qui résulte de l'action d'une onde électromagnétique sur un métal, et de l'effet Compton, qui traduit l'interaction d'une onde et d'une particule, ont permis d'élaborer une théorie qui tient compte des aspects ondulatoire et corpusculaire de la lumière.

Depuis le début du XX^e siècle, les physiciens utilisent une théorie dualiste de la lumière (et même de la matière en général). On parle en effet maintenant de la dualité onde-particule de la lumière. Ainsi, la lumière se comporte sous certaines conditions comme une onde et, sous certaines autres conditions, comme une particule. De plus, du point de vue de la physique quantique, les photons seraient des « paquets d'onde », et non des particules ponctuelles. (Ce point de vue a été introduit suite à la relation d'incertitude d'Heisenberg selon laquelle il est impossible de déterminer avec une précision infinie à la fois la vitesse et la position d'une particule.)[5].

La dualité onde-particule de la lumière nous offre une relation, étonnante au premier abord, puisqu'elle relie l'énergie d'un photon (théorie corpusculaire) à la fréquence de l'onde électromagnétique (théorie ondulatoire).

$$W=h.f \tag{1.1}$$

Où h est la constante de Planck.

Le physicien anglais JAMES CLERK MAXWELL a réussi à exprimer les lois de l'électromagnétisme vers le milieu du dix-neuvième siècle en quatre équations qui portent son nom. En combinant celles-ci, il a abouti à des équations de propagation d'onde, et a montré que cette onde électromagnétique se propage dans le vide à la vitesse de la lumière [6].

1.2.2 Equations de Maxwell

Les équations de Maxwell décrivent de façon mathématique comment sont liées et comment interagissent charges électriques, courants électriques, champs électriques et champs magnétiques. Pour le dire simplement, elles décrivent quantitativement les phénomènes électriques, magnétiques et lumineux.

Ces équations sont très importantes en physique et tirent leur grande élégance dans leur simplicité : seulement quatre équations pour décrire tous les phénomènes de l'électromagnétisme [7].

Ci-après, nous allons voir ce que disent qualitativement ces équations, une par une.

Équation de Maxwell-Gauss :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon} \quad (1.2)$$

« la divergence du champ électrique est proportionnelle à la distribution de charges électriques ».

Équation de Maxwell-Thomson :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{H} = 0 \quad (1.3)$$

« la divergence du champ magnétique est nulle. »

Equation de Maxwell-Faraday :

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (1.4)$$

« le rotationnel du champ électrique est proportionnel à la variation du champ magnétique au cours du temps »

Équation de Maxwell-Ampère :

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{H} = \vec{j} + \epsilon \cdot \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (1.5)$$

« le rotationnel du champ magnétique est la somme de sa dépendance à la variation du champ électrique au cours du temps et d'un courant électrique fixe »

Tels que :

\vec{E} : Champ électrique.

\vec{H} : Champ magnétique.

ρ : Densité de charges.

\vec{j} : Densité de courant électrique.

ε : Permittivité magnétique.

D'où $\vec{B} = \mu \cdot \vec{H}$, Induction magnétique.

Les équations de Maxwell-Ampère et de Maxwell-Faraday montrent que les deux champs électriques et magnétiques sont couplés et que la variation de l'un est proportionnelle à l'intensité du champ de l'autre. Elles traduisent de la même façon la conversion de la composante magnétique d'une onde électromagnétique en sa composante électrique et vice-versa.

Le génie mathématique de MAXWELL lui a permis ainsi de condenser une vingtaine de lois décrivant des phénomènes simples et plus ou moins indépendants dans seulement quatre équations cohérentes (par contre, l'élégance des équations de Maxwell n'enlève rien à la complexité des calculs et applications numériques qui peuvent en découler)[8].

Dans l'espace libre ou vide, où n'existe ni charge ($\rho = 0$), ni courant ($I = 0$), ces équations sont légèrement plus simple et deviennent sous leur formes différentielles :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = 0 \qquad \vec{\nabla} \cdot \vec{H} = 0 \qquad (1.6)$$

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \qquad \vec{\nabla} \wedge \vec{H} = \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \qquad (1.7)$$

1.2.3 Equations d'onde :

Les équations de Maxwell appliquées à un milieu connu avec des conditions initiales et aux limites données, permettent théoriquement de décrire les champs électromagnétiques sous certaines conditions [9].

Ces équations sont utilisées pour l'étude de propagation dans des structures d'intérêt telles que les guides d'ondes [10].

En prenant le rotationnel de l'équation (1.7) :

$$\begin{aligned}
 \vec{\nabla} \wedge \vec{\nabla} \wedge \vec{E} &= \vec{\nabla} \wedge \left(-\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \right) \\
 &= -\mu \cdot \frac{\partial (\vec{\nabla} \wedge \vec{H})}{\partial t} \\
 &= -\varepsilon \cdot \mu \cdot \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} - \mu \cdot \frac{\partial \vec{J}}{\partial t}
 \end{aligned} \tag{1.8}$$

Où : μ : la perméabilité magnétique et ε : La permittivité magnétique.

Or :

$$\begin{aligned}
 \vec{\nabla} \wedge \vec{\nabla} \wedge \vec{E} &= \vec{\nabla} \cdot (\vec{\nabla} \cdot \vec{E}) - (\vec{\nabla} \cdot \vec{\nabla}) \cdot \vec{E} \quad \text{propriété des fonctions vectorielles} \\
 \vec{\nabla} \wedge \vec{\nabla} \wedge \vec{E} &= \vec{\nabla} \left(\frac{\rho}{\varepsilon} \right) - \vec{\nabla}^2 \vec{E}
 \end{aligned} \tag{1.9}$$

En utilisant (1.8) et (1.9), nous obtenons :

$$\varepsilon \cdot \mu \cdot \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} + \mu \cdot \frac{\partial \vec{J}}{\partial t} = \vec{\nabla}^2 \vec{E} - \frac{1}{\varepsilon} \vec{\nabla}(\rho)$$

Avec : $\Delta = \vec{\nabla}^2$ Laplacien.

L'équation d'onde dans un milieu matériel homogène (ε, μ) s'écrit :

$$\varepsilon \cdot \mu \cdot \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} + \mu \cdot \frac{\partial \vec{J}}{\partial t} = \Delta \vec{E} - \frac{1}{\varepsilon} \cdot \vec{\nabla} \rho \tag{1.10}$$

En absence de charges, et de courant ($J = 0, \rho = 0$) dans le cas d'un milieu diélectrique homogène l'équation (1.10) se réduit à :

$$\Delta \vec{E} - \varepsilon \cdot \mu \cdot \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0 \quad (\text{Équation d'onde pour un champ électrique}) \tag{1.11}$$

De la même manière, nous trouvons l'équation d'onde pour un champ magnétique.

$$\Delta \vec{H} - \varepsilon \cdot \mu \cdot \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} = 0 \quad (\text{Équation d'onde pour un champ magnétique}) \tag{1.11*}$$

Dans le cas où le champ électromagnétique a une variation harmonique dans le temps et suivant la direction de propagation z :

$$\vec{E}(x, y, z, t) = \vec{E}_0(x, y)e^{j(\omega t - \beta z)} \quad (1.12)$$

$$\vec{H}(x, y, z, t) = \vec{H}_0(x, y)e^{j(\omega t - \beta z)} \quad (1.13)$$

Nous obtenons les équations d'ondes :

$$\frac{\partial^2 \vec{E}_0(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \vec{E}_0(x, y)}{\partial y^2} + [k_0^2 n^2 - \beta^2] \vec{E}_0(x, y) = 0 \quad (1.14)$$

$$\frac{\partial^2 \vec{H}_0(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \vec{H}_0(x, y)}{\partial y^2} + [k_0^2 n^2 - \beta^2] \vec{H}_0(x, y) = 0 \quad (1.15)$$

Où $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda}$, Vecteur d'onde.

β : Constante de propagation.

n : Indice de réfraction.

1.3 Théorie des guides optiques :

Les guides d'onde optiques sont des guides qui confinent et guident la lumière. Les guides optiques sont basés sur le principe de la réflexion interne totale où la lumière est confinée optiquement dans une région de haut indice de réfraction entourée par un revêtement d'indice de réfraction inférieur. Récemment, le guide d'onde emploie généralement des géométries planaires de dimensions nanométriques et de matériau qui permettent des fonctions de type couplage, modulation, multiplexage, amplification, etc. Ces guides sont associés aux fibres optiques de structure cylindrique dont la fonction principale est la transmission de l'information [11].

1.3.1 Modes des guides optiques :

En fonction de la polarisation, l'onde électromagnétique peut être classifiée en deux modes : le mode transverse électrique (TE) et le mode transverse magnétique (TM).

Dans le cas de guide de mode TE, le champ électrique n'existe pas dans la direction de propagation de l'onde ($E_z=0$),

$$\vec{E} \begin{cases} E_x = 0 \\ E_y \neq 0 \\ E_z = 0 \end{cases} \qquad \vec{H} \begin{cases} H_x \neq 0 \\ H_y = 0 \\ H_z \neq 0 \end{cases}$$

De même pour le guide de mode TM, le champ magnétique n'existe pas dans la direction de propagation de l'onde ($H_z=0$) [12].

$$\vec{E} \begin{cases} E_x \neq 0 \\ E_y = 0 \\ E_z \neq 0 \end{cases} \qquad \vec{H} \begin{cases} H_x = 0 \\ H_y \neq 0 \\ H_z = 0 \end{cases}$$

1.3.2 Guide optique planaire :

Le guide d'onde plan est un empilement de trois couches de matériaux d'indices de réfraction différents (figure 1.3.). La lumière se propage préférentiellement dans la couche d'indice de réfraction n_2 si celle-ci est entourée de deux couches : une couche inférieure de substrat d'indice de réfraction n_3 et une couche supérieure de couverture d'indice de réfraction n_1 . Pour qu'il y ait guidage de la lumière, il faut que l'indice de réfraction n_2 de la couche guidante (active) soit supérieur à celui des couches latérales, où le champ est évanescent [13].

La lumière est confinée selon l'axe vertical (x) et se propage dans la direction (z). Du fait de l'invariance de cette structure dans la direction (y), la lumière ne peut être confinée dans cette direction.

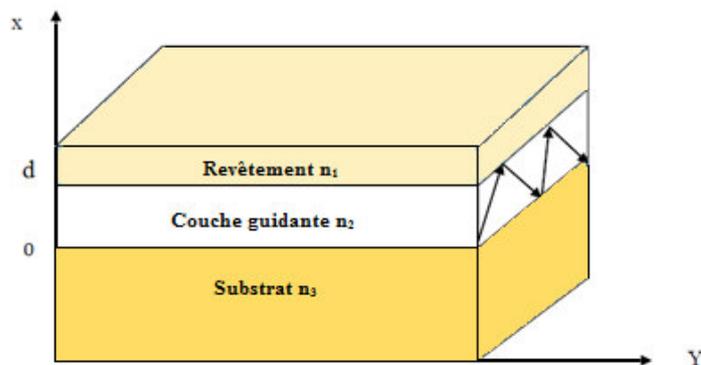


Figure 1.1. Représentation graphique d'un guide d'onde planaire.

1.3.3 Guide bidimensionnel :

Un guide d'onde plan présente généralement peu d'intérêt en optique intégrée car la lumière diverge transversalement lors de sa propagation, d'où la nécessité de la réalisation des guides à deux dimensions.

Avec la technologie actuelle, il est aisé de réaliser un confinement latéral en utilisant un guide bidirectionnel. On appelle un guide bidimensionnel un guide d'onde de section constante invariante en z et dont l'indice de réfraction varie dans la section. Les modes TE et TM n'existent pas au sens strict pour un guide d'onde bidirectionnel, néanmoins il y a toujours deux familles de solutions qu'on désigne par les termes quasi-TE et quasi-TM.

1.3.4 Guide optique rectangulaire :

Dans les guides d'ondes optiques 1D, la lumière est confinée dans une seule dimension (la dimension x dans notre notation). Dans la plupart des guides d'ondes réels, la lumière est confinée dans deux dimensions (x et y) et se déplace dans la direction z .

La section transversale d'un guide optique rectangulaire est illustrée sur la figure 1.2 :

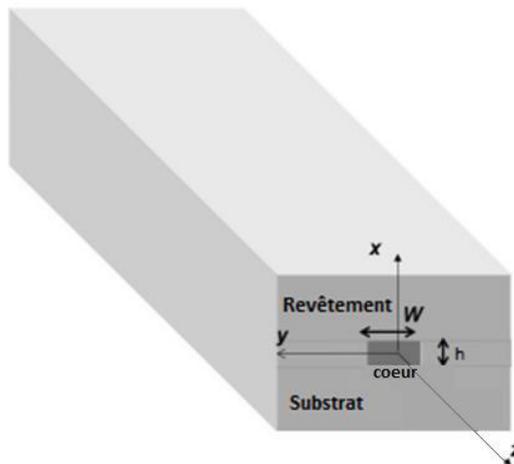


Figure 1.2. Représentation graphique d'un guide d'onde rectangulaire.

Il existe différents types de guides non planaires qui sont différenciés par les caractéristiques spécifiques de leur profil d'indice. On peut citer :

- Guide Buried Channel.
- Guide Rib.
- Guide Ridge.

a Guide Buried Channel :

Ce guide est formé par un cœur de haut d'indice entouré par un milieu de faible indice. La section transversale de la couche guidante peut avoir une géométrie quelconque, mais généralement de forme rectangulaire.

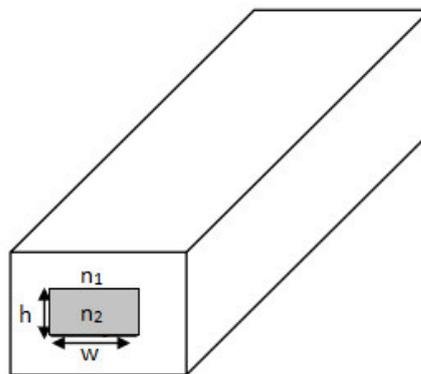


Figure 1.3. Guide Buried Channel.

b Guide Rib

Le guide d'onde Rib est un guide d'ondes, dans lequel la couche de guidage se compose essentiellement d'un cœur déposé sur une couche du même indice.

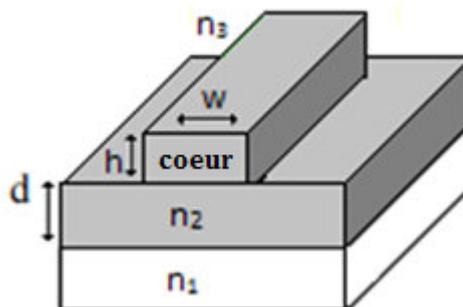


Figure 1.4. Guide Rib.

n_1 , n_2 et n_3 des indices de réfractons tel que : $n_2 > n_1 > n_3$

c *Guide Ridge*

Le guide Ridge est composé d'un cœur à haut d'indice, entouré par les trois côtés par un milieu de faible indice (air ou matériaux).

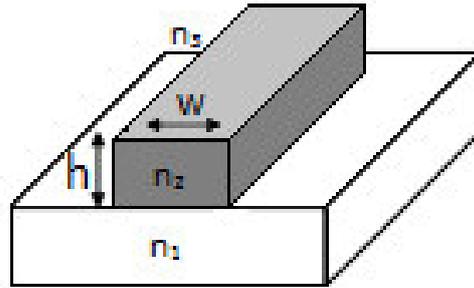


Figure 1.5. Guide Ridge.

1.3.5 Notion d'indice effectif

L'indice effectif n_{eff} représente la valeur de l'indice de réfraction d'un matériau uniforme pour que les ondes s'y propagent avec la même vitesse de phase que dans le guide. C'est en fait un résumé du guide qui tient compte des indices des différents matériaux et de la forme du guide pour chaque longueur d'onde et chaque mode de propagation [11].

$$n_{eff} = \frac{\beta}{k_0} \quad (1.16)$$

1.3.6 Facteur de confinement

Pour différentes caractéristiques des matériaux utilisés dans la fabrication des guides, on obtient plusieurs choix.

Notre objectif est de sélectionner le meilleur en se basant sur certains critères, parmi :

- Le maximum de puissance dans la couche guidante.
- En tendant vers les extrémités du guide, les champs doivent être nuls, pour les fuites d'ondes en dehors du guide.

Ces deux critères peuvent être contrôlés par un facteur très important appelé facteur de confinement.

Ce facteur de confinement est le rapport de la puissance dans la couche guidante à la puissance totale.

$$\Gamma = \frac{\text{Puissance dans le guide}}{\text{Puissance totale}} \quad (1.17)$$

Avec :

$$\Gamma = \frac{\int_{\text{guide}} |E|^2 dx.dy}{\int_{\text{structure}} |E|^2 dx.dy} \quad (1.18)$$

Où E est la composante de champ électrique.

1.4 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons décrit brièvement quelques rappels théoriques sur :

- Le phénomène des ondes électromagnétiques en commençant par la théorie électromagnétique de la lumière, ensuite les fameuses équations de Maxwell qui nous donnent dans des conditions spécifiques, l'équation d'onde appropriée.

- La dernière partie, nous l'avons consacré aux guides optiques, nous avons commencé par décrire la théorie des guides optiques, ensuite nous avons défini :
 - Modes des guides optiques.
 - Guide optique planaire.
 - Guide bidimensionnel.
 - Guide optique rectangulaire.
 - à la fin nous avons parlé de la notion d'indice effectif et de facteur de confinement.

Chapitre 2 Guides optiques à une dimension

2.1 Introduction

L'étude des propriétés de propagation de la lumière dans un guide optique permet d'avoir accès aux caractéristiques optiques du guide, comme l'indice effectif (la constante de propagation), le facteur de confinement, etc...

Le présent chapitre traite l'étude de la propagation de la lumière dans les guides optiques plans unidimensionnels, en utilisant le logiciel Mathcad, et le logiciel Comsol qui utilise la méthode des éléments finis pour simuler l'indice effectif et le facteur de confinement.

Ce chapitre comporte :

- Etude des guides optiques plans à trois couches.
- Etude des guides optiques plans à N couches.
- Description du logiciel mathcad et du logiciel comsol.
- Simulation des guides optiques plans à trois couches dans le cas asymétrique et dans le cas symétrique pour les deux modes TE et TM.
- Application sur un guide optique plan à cinq couches a été faite par le logiciel Mathcad pour simuler l'indice effectif.
- Interprétation des résultats obtenus, et conclusion.

2.2 Théorie

2.2.1 Guide optique plan à trois couches

Comme nous l'avons mentionné dans le chapitre précédent, c'est un guide de lumière composé de trois couches, avec des épaisseurs et des indices de réfraction appropriés (figure 2.1).

L'indice de réfraction de la couche guidante n_2 doit être supérieur à celui des couches latérales pour assurer la propagation de la lumière.

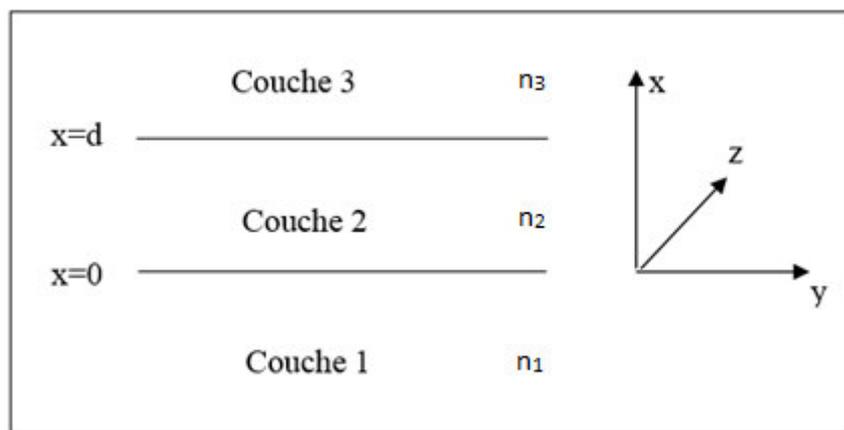


Figure 2.1. Guide optique plan à 3 couches.

La structure est homogène suivant y , donc le champ ne varie pas suivant cette direction ($\frac{\partial}{\partial y} = 0$).

a Méthode de l'indice effectif à une dimension

Dans cette partie, nous discutons de l'analyse d'un guide optique à trois couches avec une structure unidimensionnelle (1D) [14,15].

Les équations d'ondes dans ce cas deviennent :

$$\frac{d^2 \vec{E}_0(x)}{dx^2} + k_0^2 (n_i^2 - \beta^2) \vec{E}_0(x) = 0 \quad (i=1,2,3\dots) \quad (2.1)$$

$$\frac{d^2 \vec{H}_0(x)}{dx^2} + k_0^2 (n_i^2 - \beta^2) \vec{H}_0(x) = 0 \quad (i=1,2,3\dots) \quad (2.2)$$

Ensuite, nous discuterons des deux modes qui se propagent dans le guide optique à trois couches : le mode électrique transversal (mode TE) et le mode magnétique transversal (mode TM) [8].

❖ Résolution en mode TE

Dans le mode TE, le champ électrique ne se trouve pas dans la direction longitudinale ($E_z = 0$), mais dans la direction transversale ($E_y \neq 0$).

$$\vec{E} \begin{cases} E_x = 0 \\ E_y \neq 0 \\ E_z = 0 \end{cases} \quad \vec{H} \begin{cases} H_x \neq 0 \\ H_y = 0 \\ H_z \neq 0 \end{cases}$$

L'équation d'onde scalaire devient :

$$\frac{d^2 E_y(x)}{dx^2} + k_0^2 (n_i^2 - \beta^2) E_y = 0 \quad (i=1,2,3\dots) \quad (2.3)$$

Les solutions de cette équations dans les trois couches seront données par :

$$E_{y1}(x) = C_1 \cdot \exp(\gamma_1 \cdot x) \quad x < 0 \quad (2.4)$$

$$E_{y2}(x) = C_2 \cdot \cos(\gamma_2 \cdot x + \alpha) \quad 0 < x < d \quad (2.5)$$

$$E_{y3}(x) = C_3 \cdot \exp(-\gamma_3(x - d)) \quad x > d \quad (2.6)$$

Avec :

$$\gamma_1 = k_0 \sqrt{n_{eff}^2 - n_1^2}$$

$$\gamma_2 = k_0 \sqrt{n_2^2 - n_{eff}^2}$$

$$\gamma_3 = k_0 \sqrt{n_{eff}^2 - n_3^2}$$

C_1, C_2 et C_3 des constants et k_0 est le vecteur d'ondes dans le vide.

Le champ électrique doit vérifier les conditions aux limites qui sont la continuité des composantes tangentielles du champ : E_y et H_z .

Des équations de MAXWELL on peut montrer que :

$$H_z = \frac{-1}{j.\omega.\mu_0} \cdot \frac{\partial E_y}{\partial x} \quad (2.7)$$

Ces conditions se résument en la continuité de E_y et $\frac{\partial E_y}{\partial x}$

En $x = 0$

$$E_{y1}(0) = E_{y2}(0) \quad (2.8)$$

$$\frac{\partial E_{y1}}{\partial x}(0) = \frac{\partial E_{y2}}{\partial x}(0) \quad (2.9)$$

En $x = d$:

$$E_{y2}(d) = E_{y3}(d) \quad (2.10)$$

$$\frac{\partial E_{y2}}{\partial x}(d) = \frac{\partial E_{y3}}{\partial x}(d) \quad (2.11)$$

D'où les équations :

$$C_1 = C_2 \cdot \cos\alpha \quad (\text{de l'équation (2.8)}) \quad (2.12)$$

$$-\gamma_1 \cdot C_1 = \gamma_2 \cdot C_2 \cdot \sin\alpha \quad (\text{de l'équation (2.9)}) \quad (2.13)$$

$$C_2 \cdot \cos(\gamma_2 \cdot d + \alpha) = C_3 \quad (\text{de l'équation (2.10)}) \quad (2.14)$$

$$-\gamma_2 \cdot C_2 \cdot \sin(\gamma_2 \cdot d + \alpha) = -\gamma_3 \cdot C_3 \quad (\text{de l'équation (2.11)}) \quad (2.15)$$

En divisant l'équation (2.13) par (2.12), nous obtenons :

$$\alpha = -\tan^{-1}\left(\frac{\gamma_1}{\gamma_2}\right) + q_1 \cdot \pi \quad (q_1 = 0,1,2,..) \quad (2.16)$$

D'autre part, en divisant l'équation (2.15) par (2.14), nous obtenons :

$$\gamma_2 \cdot d = \tan^{-1} \left(\frac{\gamma_3}{\gamma_2} \right) - \alpha + q_2 \cdot \pi \quad (q_2 = 0,1,2..) \quad (2.17)$$

Où d est l'épaisseur de la couche guidante.

En Substituant α de l'équation (2.16) dans l'équation (2.17). On aboutit à l'équation caractéristique suivante appelée équation aux valeurs propres :

$$\gamma_2 \cdot d = \tan^{-1} \left(\frac{\gamma_1}{\gamma_2} \right) + \tan^{-1} \left(\frac{\gamma_3}{\gamma_2} \right) + q \cdot \pi \quad (q = 0,1,2..) \quad (2.18)$$

Avec q est l'ordre du mode.

Dans le cas d'un guide symétrique ($\gamma_1 = \gamma_3$) on obtient :

$$\gamma_2 \cdot d - 2 \tan^{-1} \left(\frac{\gamma_1}{\gamma_2} \right) + q\pi = 0 \quad (2.19)$$

La résolution de cette équation va nous permettre de déterminer les valeurs de β des différents modes d'où l'indice effectif et le facteur de confinement :

$$\Gamma = \frac{\text{Puissance guide}}{\text{Puissance total}} = \frac{\int_{\text{guide}} |E_y|^2 \cdot dx}{\int_{\text{total}} |E_y|^2 \cdot dx} \quad (2.20)$$

❖ Résolution en mode TM

Dans le mode TM, la composante du champ magnétique ne se trouve pas dans la direction longitudinale ($H_z = 0$), mais dans la direction transversale ($H_y \neq 0$).

$$\vec{H} \begin{cases} H_x=0 \\ H_y \neq 0 \\ H_z=0 \end{cases} \quad \vec{E} \begin{cases} E_x \neq 0 \\ E_y=0 \\ E_z \neq 0 \end{cases}$$

L'équation d'onde scalaire devient :

$$\frac{d^2 H_y(x)}{dx^2} + k_0^2 (n_i^2 - \beta^2) H_y = 0 \quad (i=1,2,3...) \quad (2.21)$$

Les solutions de cette équations dans les trois couches seront données par :

$$H_{y1}(x) = C_1 \exp(\gamma_1 x) \quad x < 0 \quad (2.22)$$

$$H_{y2}(x) = C_2 \cos(\gamma_2 x + \alpha) \quad 0 < x < d \quad (2.23)$$

$$H_{y2}(x) = C_3 \exp[-\gamma_3(x - d)] \quad x > d \quad (2.24)$$

$$\text{Avec : } \gamma_1 = k_0 \cdot \sqrt{n_{eff}^2 - n_1^2}$$

$$\gamma_2 = k_0 \cdot \sqrt{n_2^2 - n_{eff}^2}$$

$$\gamma_3 = k_0 \cdot \sqrt{n_{eff}^2 - n_3^2}$$

Le champ magnétique doit vérifier les conditions aux limites qui sont la continuité des composantes tangentielles du champ : H_y et E_z .

Des équations de MAXWELL on peut montrer que :

$$E_z = \frac{1}{j\omega\epsilon_0\epsilon_r} \frac{\partial H_y}{\partial x} \quad (2.25)$$

Ces conditions se résument en la continuité de H_y et $\frac{1}{n^2} \frac{\partial H_y}{\partial x}$

En $x = 0$

$$H_{y1}(0) = H_{y2}(0) \quad (2.26)$$

$$\frac{1}{n_1} \frac{\partial H_{y1}}{\partial x}(0) = \frac{1}{n_2} \frac{\partial H_{y2}}{\partial x}(0) \quad (2.27)$$

En $x = d$:

$$H_{y2}(d) = H_{y3}(d) \quad (2.28)$$

$$\frac{1}{n_2} \frac{\partial H_{y2}}{\partial x}(d) = \frac{1}{n_3} \frac{\partial H_{y3}}{\partial x}(d) \quad (2.29)$$

D'où les équations sont :

$$C_1 = C_2 \cos \alpha \quad [\text{de l'équation (2.26)}] \quad (2.30)$$

$$-\frac{\gamma_1}{n_1} C_1 = \frac{\gamma_1}{n_2} C_2 \sin \alpha \quad [\text{de l'équation (2.27)}] \quad (2.31)$$

$$C_2 \cos(\gamma_2 d + \alpha) = C_3 \quad [\text{de l'équation (2.28)}] \quad (2.32)$$

$$-\frac{\gamma_2}{n_2} C_2 \sin(\gamma_2 d + \alpha) = -\frac{\gamma_2}{n_2} C_3 \quad [\text{de l'équation (2.29)}] \quad (2.33)$$

En divisant l'équation (2.31) par l'équation (2.30), nous obtenons :

$$\alpha = -\tan^{-1} \left(\frac{n_2}{n_1} \frac{\gamma_1}{\gamma_2} \right) + q_1 \pi \quad (q_1 = 0, 1, 2, \dots) \quad (2.34)$$

D'autre part, en divisant l'équation (2.33) par l'équation (2.32), nous obtenons :

$$\gamma_2 d = \tan^{-1} \left(\frac{n_2}{n_3} \frac{\gamma_3}{\gamma_2} \right) - \alpha + q_2 \pi \quad (q_2 = 0, 1, 2, \dots) \quad (2.35)$$

En remplaçant la variable α de l'équation (2.34) dans l'équation (2.35), nous obtenons l'équation aux valeurs propres suivante :

$$\gamma_2 d = \tan^{-1} \left(\frac{n_2}{n_1} \frac{\gamma_1}{\gamma_2} \right) + \tan^{-1} \left(\frac{n_2}{n_3} \frac{\gamma_3}{\gamma_2} \right) + q \pi \quad (q = 0, 1, 2, \dots) \quad (2.36)$$

Dans le cas d'un guide symétrique ($\gamma_1 = \gamma_3$) on obtient :

$$\gamma_2 \cdot d - 2 \arctan \left(\frac{\gamma_1 \cdot n_1^2}{\gamma_2 \cdot n_2^2} \right) + q \pi = 0 \quad (2.37)$$

La résolution de cette équation va nous permettre de déterminer les valeurs de β des différents modes d'où l'indice effectif et le facteur de confinement :

$$\Gamma = \frac{\text{Puissance}_{\text{guide}}}{\text{Puissance}_{\text{total}}} = \frac{\int_{\text{guide}} |H_y|^2 \cdot dx}{\int_{\text{total}} |H_y|^2 \cdot dx} \quad (2.38)$$

2.2.2 Guide optique plan à N couches

a Définition

C'est un guide multicouche plan comme il est représenté sur la figure 2.2. :

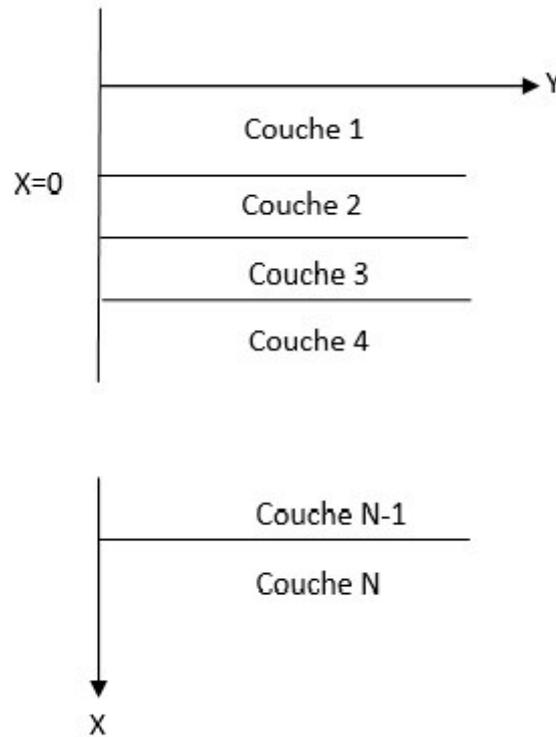


Figure 2.2. Guide plan à N couches.

Les modes TE qui peuvent se propager dans ce guide peuvent être mis sous la forme :

$$E_y(x, z, t) = E_y(x) \cdot \exp[j(\omega \cdot t - \beta \cdot z)] \quad (2.39)$$

b Méthode des matrices de transfert

Le champ ne dépend pas de y (guide infini suivant y), β est la constante de propagation du mode et z est la direction de propagation.

Le champ E_y est solution de l'équation d'onde qui dans la couche j , sera donnée par :

$$\frac{\partial^2 E_j(x)}{\partial x^2} - (\beta^2 - n_j^2 k_0^2) \cdot E_j(x) = 0 \quad (2.40)$$

La solution générale de l'équation (2.40) est de la forme :

$$E_j(x) = A_j \exp[\alpha_j(x - x_{j-1})] + B_j \exp[-\alpha_j(x - x_{j-1})] \quad (2.41)$$

Où : $\alpha_j = (\beta^2 - n_j^2 k_0^2)^{\frac{1}{2}}$

A_j et B_j sont les coefficients du champs dans la couche j .

Les conditions aux limites nécessitent que les composantes tangentielles du champ électromagnétique soient continuées aux interfaces. Dans le cas des modes TE, ces conditions se réduisent à la continuité du champ électrique et de sa dérivée.

Pour l'interface entre la couche j et $j + 1$ nous avons :

$$\begin{cases} E_j(x_j) = E_{j+1}(x_j) & (2.42) \\ \frac{\partial E_j(x_j)}{\partial x} = \frac{\partial E_{j+1}(x_j)}{\partial x} & (2.43) \end{cases}$$

Ces équations mènent aux relations entre les coefficients du champ

$$\begin{cases} A_j \exp(\delta_j) + B_j \exp(-\delta_j) = A_{j+1} + B_{j+1} & (2.44) \\ A_j \frac{\alpha_j}{\alpha_{j+1}} \exp(\delta_j) - B_j \frac{\alpha_j}{\alpha_{j+1}} \exp(-\delta_j) = A_{j+1} - B_{j+1} & (2.45) \end{cases}$$

Avec : $\delta_j = \alpha_j \cdot d_j$

Où d_j : épaisseur de la couche j .

Des relations (2.44), (2.45), on peut obtenir une relation récursive entre les coefficients sous forme matricielle :

$$\begin{pmatrix} A_{j+1} \\ B_{j+1} \end{pmatrix} = H_j \begin{pmatrix} A_j \\ B_j \end{pmatrix} \quad (2.46)$$

Où :
$$H_j = \begin{pmatrix} \frac{1}{2} \left(1 + \frac{\alpha_j}{\alpha_{j+1}}\right) \exp(\delta_j) & \frac{1}{2} \left(1 - \frac{\alpha_j}{\alpha_{j+1}}\right) \exp(-\delta_j) \\ \frac{1}{2} \left(1 - \frac{\alpha_j}{\alpha_{j+1}}\right) \exp(\delta_j) & \frac{1}{2} \left(1 + \frac{\alpha_j}{\alpha_{j+1}}\right) \exp(-\delta_j) \end{pmatrix} \quad (2.47)$$

En utilisant la relation (2.46), on peut calculer les coefficients de la dernière couche à partir de ceux de la première couche

$$\begin{pmatrix} A \\ B \end{pmatrix}_N = T_G \cdot \begin{pmatrix} A \\ B \end{pmatrix}_1 \quad (2.48)$$

Avec :
$$T_G = \prod_{N-1}^1 (H_k) \quad (2.49)$$

Et comme dans un guide le champ doit être évanescent pour $x = \pm\infty$, c.à.d. dans les couches 1 et N , dans les deux couches l'un des coefficients doit être nul, et on doit avoir :

$$\begin{pmatrix} A \\ B \end{pmatrix}_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \cdot a \quad (2.50)$$

$$\begin{pmatrix} A \\ B \end{pmatrix}_N = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \cdot b \quad (2.51)$$

De (2.48), (2.50) et (2.51) on a :

$$T_G \begin{pmatrix} a \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h_{11} \\ h_{21} \end{pmatrix} \cdot a = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \cdot b \quad (2.52)$$

Où bien encore :

$$h_{11} \cdot a = 0 \quad (2.53)$$

Comme $a \neq 0$ on doit avoir :

$$h_{11} \cdot (\beta) = 0 \quad (2.54)$$

La résolution de l'équation (2.54) nous donne les valeurs de β des différents modes. Une fois les valeurs de β déterminées, on peut calculer les coefficients A_j et B_j de chaque couche en utilisant l'équation réursive (2.46) et en fixant le coefficient a de la première couche à 1.

L'indice effectif sera donné par l'équation (1.16)

Le facteur de confinement qui mesure l'efficacité du guide est défini par le rapport de la puissance lumineuse confinée dans le cœur du guide et la puissance totale dans le guide. Et comme, dans le cas d'une polarisation TE, la puissance optique est proportionnelle au carré du champ électrique, ce facteur sera donné par :

$$\Gamma = \frac{\int_{guide} |E|^2 dx}{\int_{-\infty}^{+\infty} |E|^2 dx} \quad (2.56)$$

2.3 Simulations

Dans cette partie, nous présentons les différents résultats de simulation d'un guide optique à trois couches de type général asymétrique et de type symétrique. Nous concéderons les deux modes. Enfin l'indice effectif et le facteur de confinement seront déterminés avec les méthodes de calculs :

- Méthode de l'indice effectif (M.I.E) (pour les guides à 3 couches)
- Méthode des éléments finis (M.E.F) (pour les guides à 3 couches)

Nous présentons aussi les résultats de simulation d'un exemple de guide optique à 5 couches avec une couche guidante en GaAs, dans le cas de mode TE, avec la méthode des Matrices de transfert (M.M.T).

2.3.1 Description des logiciels utilisés

a Le logiciel Mathcad

Ce logiciel permet de réaliser des calculs scientifiques. Son interface permet de réaliser des rapports, c'est-à-dire des documents formatés qui mêlent des calculs et des textes nécessaires à la compréhension d'un projet d'ingénierie.

b Le logiciel Comsol :

Ce logiciel propose des outils dédiés à la simulation de la propagation des ondes électromagnétiques dans des milieux optiques linéaires et non linéaires, afin de permettre une simulation précise des composants optiques et une optimisation de

leurs designs [16]. Il utilise la méthode des éléments finis pour résoudre les équations aux dérivées partielles.

2.3.2 Résultats de simulation des guides optiques plans à trois couches

a Guides asymétriques

La figure-2.3- représente la structure d'un guide plan à trois couches asymétriques avec les indices : $n_1 = 1,5$, $n_2 = 3,5$, et $n_3 = 2,5$ pour une longueur d'onde $\lambda = 1,5 \mu m$.

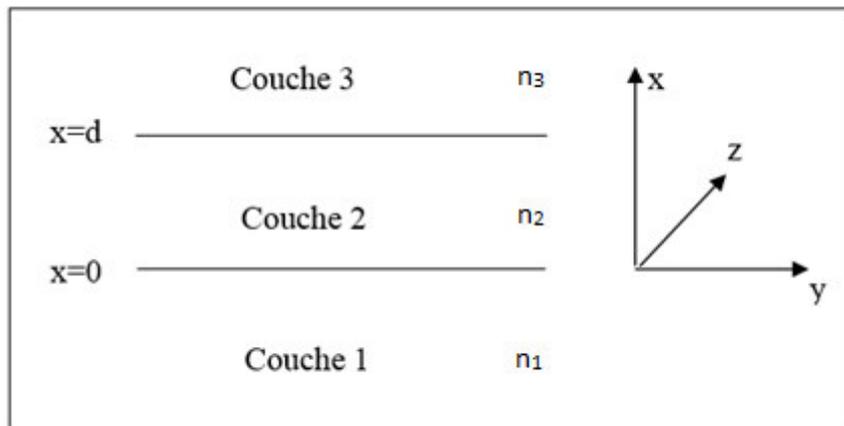


Figure 2.3. Section de guide optique plan à trois couches.

Dans notre travail, nous varions l'épaisseur de la couche guidante d , l'indice de réfraction de la couche guidante n_2 et la longueur d'onde λ , et nous effectuons une série de simulation, afin de déterminer l'indice effectif et le facteur de confinement en mode TE et TM.

❖ Résolution en mode TE

Dans le cas de transverse électrique le champ électrique \vec{E} est confiné dans le plan transverse ($E_z = 0, H_z \neq 0$).

- Répartition du champ électrique E_y dans un guide asymétrique 1D à trois couches en mode TE avec $d=1\mu\text{m}$:

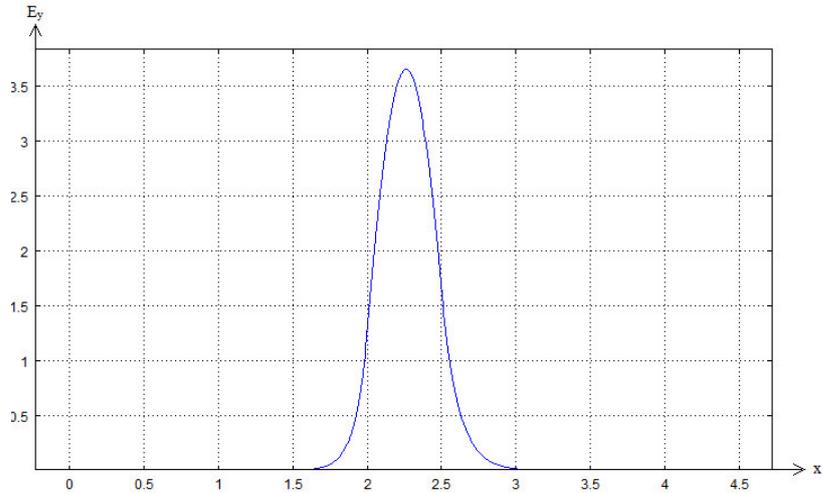


Figure 2.4. Répartition du champ électrique E_y dans un guide asymétrique 1D à trois couches en mode TE.

Nous remarquons que le champ électrique est confiné dans le guide.

- Evolution de l'indice effectif n_{eff} en fonction de l'épaisseur de la couche guidante d :

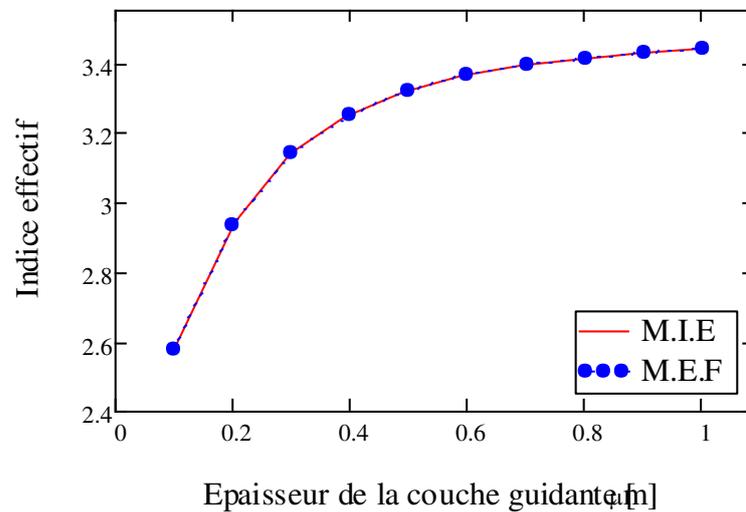


Figure 2.5. Variation de l'indice effectif en fonction de l'épaisseur d de la couche guidante.

D'après cette figure nous remarquons que l'indice effectif croit de 2,58 à 3,441 lorsque l'épaisseur de la couche guidante augmente de 0,1 à 1 μm .

- Evolution de l'indice effectif n_{eff} en fonction de l'indice de réfraction de la couche guidante n_2 avec $d = 0,5 \mu m$:

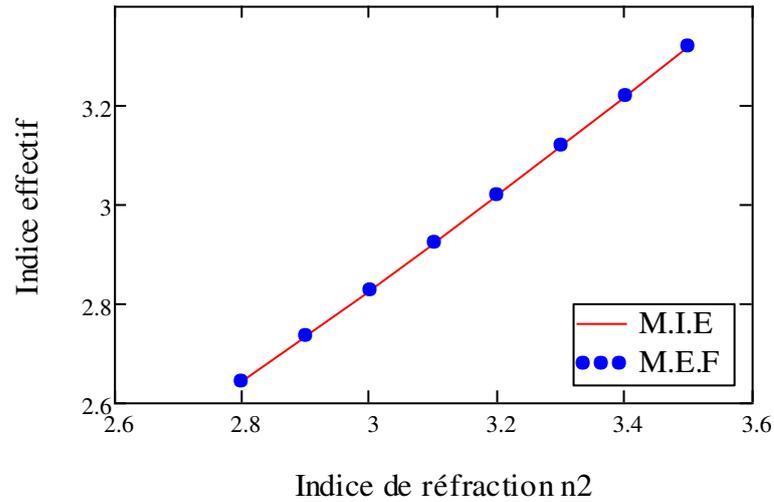


Figure 2.6. Variation de l'indice effectif en fonction de l'indice de réfraction n_2 de la couche guidante.

Cette figure montre que l'indice effectif augmente de 2,645 à 3,321 quand l'indice de réfraction de la couche guidante croit de 2,8 à 3,5.

- Evolution de l'indice effectif n_{eff} en fonction de la longueur d'onde λ avec $d = 0.5 \mu m$:

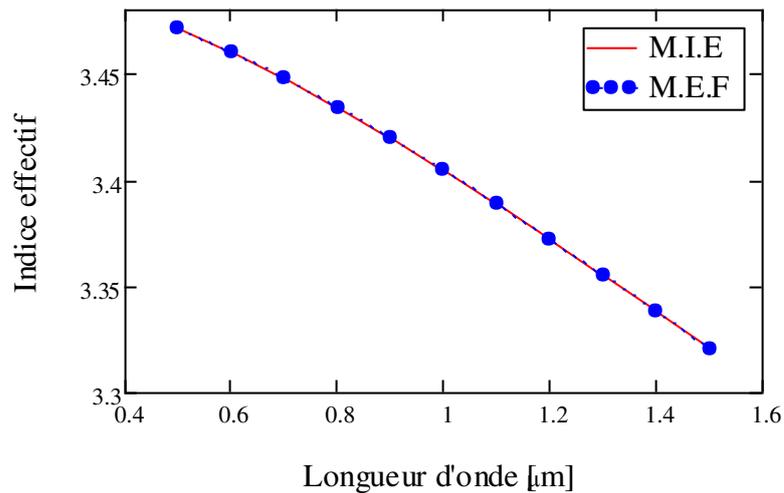


Figure 2.7. Variation de l'indice effectif en fonction de la longueur d'onde λ .

La figure 2.7 illustre que l'indice effectif décroît de 3,471 à 3,321 lorsque la longueur d'onde varié de 0,5 à 1,5 μm

Les résultats des figures 2.5, 2.6, et 2.7 sont regroupés dans le tableau suivant :

Variation de l'indice effectif		
Avec l'épaisseur de la couche guidante d de 0,1 à 1 μm .	Avec l'indice de réfraction n_2 de 2,8 à 3,5.	Avec la longueur d'onde de 0,5 à 1,5 μm .
[2,58 – 3,441]	[2,645 – 3,321]	[3,471 – 3,321]

Tableau 2.1. Variation de l'indice effectif en mode TE.

- **Evolution du facteur de confinement Γ en fonction de l'épaisseur d :**

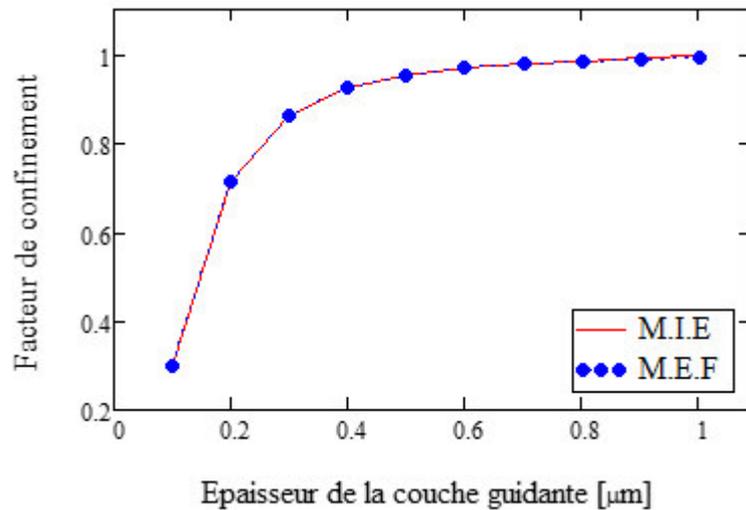


Figure 2.8. Variation du facteur de confinement Γ en fonction de l'épaisseur de la couche guidante.

D'après la figure 2.8 nous voyons que le facteur de confinement croit de 0,544 à 1 lorsque l'épaisseur de la couche guidante augmente de 0,1 à 1 μm .

- Evolution du facteur de confinement Γ en fonction de l'indice de réfraction de la couche guidante n_2 avec $d = 0.5 \mu m$:

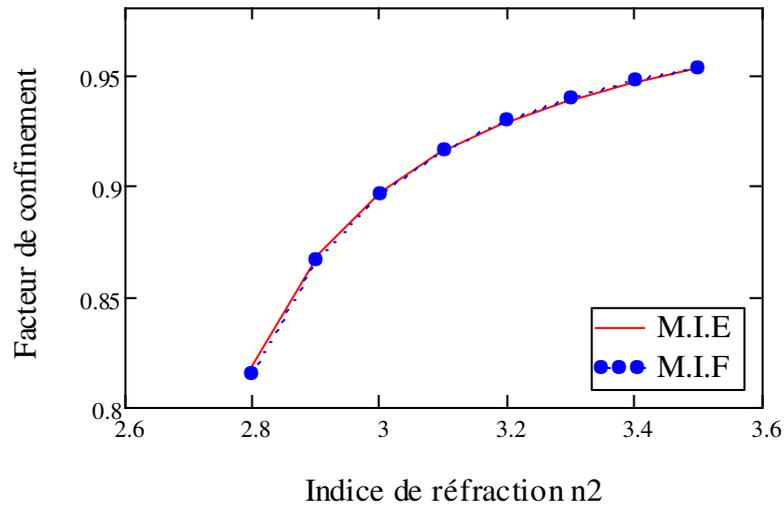


Figure 2.9. Variation du facteur de confinement Γ en fonction de l'indice de réfraction n_2 de la couche guidante.

D'après la figure 2.9 nous constatons que le facteur de confinement augmente de 0.776 à 0.98 lorsque l'indice de réfraction de la couche guidante augmente de 2,8 à 3,5 μm .

- Evolution du facteur de confinement Γ en fonction de la longueur d'onde λ avec $d = 0.5 \mu m$:

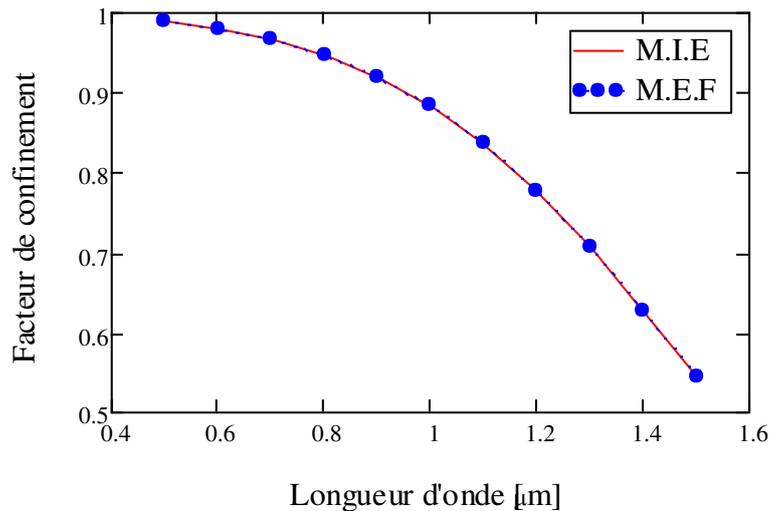


Figure 2.10. Variation du facteur de confinement Γ en fonction de la longueur d'onde λ .

Cette figure représente la variation du facteur de confinement de 0.989 à 0.546 lorsque la longueur d'onde varié de 0,5 à 1,5 μm .

Les résultats des figures 2.8, 2.9 , et 2.10 sont regroupés dans le tableau suivant :

Variation du facteur de confinement		
Avec l'épaisseur de la couche guidante d De 0.1 à 1 μm	Avec l'indice de réfraction n_2 de 2.8 à 3.5	Avec la longueur d'onde de 0.5 à 1.5 μm
[0.544 – 1]	[0.776 – 0.98]	[0.989 – 0.546]

Tableau 2.2. Variation du facteur de confinement en mode TE.

❖ Résolution en mode TM

Dans le cas de transverse magnétique, la composante du champ magnétique n'est pas dans la direction longitudinale (soit $H_z = 0$). Par le même procédé, et en considérant $H_x = H_z = E_y = 0$.

- Répartition du champ H_y dans un guide asymétrique 1D à trois couches en mode TM avec $d=1\mu m$:

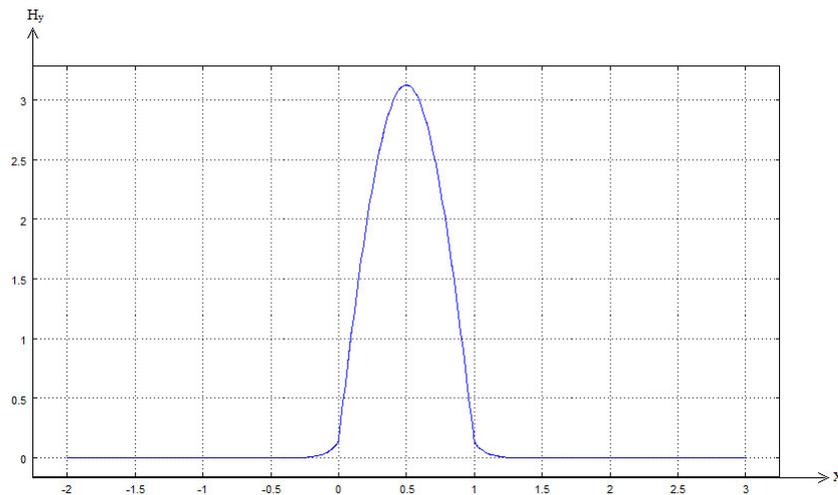


Figure 2.11. Répartition du champ magnétique H_y dans un guide asymétrique 1D à trois couches en mode TM.

La figure 2.11 montre que le champ magnétique est confiné dans le guide.

- Evolution de l'indice effectif n_{eff} en fonction de l'épaisseur de la couche guidante d :

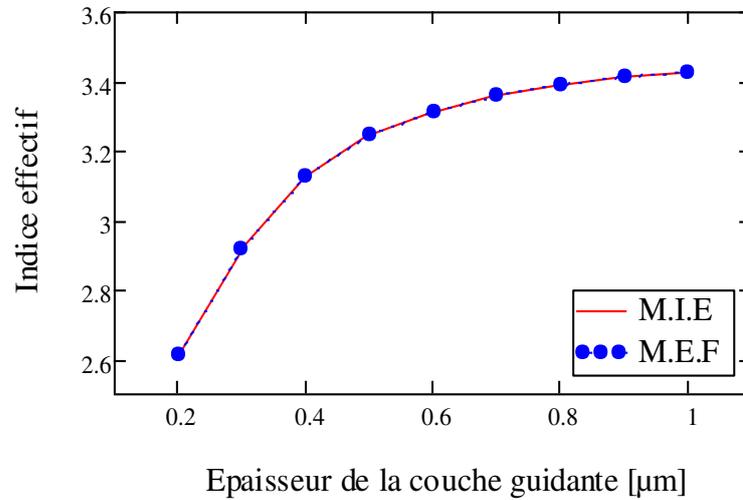


Figure 2.12. Variation de l'indice effectif en fonction de l'épaisseur d de la couche guidante.

Cette figure montre que l'indice effectif croit de 2,482 à 3,439 lorsque l'épaisseur de la couche guidante croit de 0,2 à 1 μm .

- Evolution de l'indice effectif n_{eff} en fonction de l'indice de réfraction de la couche guidante n_2 avec $d = 0.2 \mu\text{m}$:

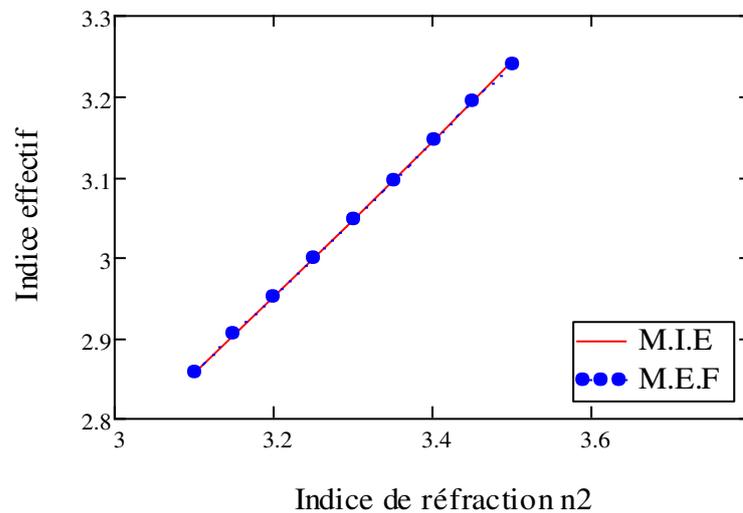


Figure 2.13. Variation de l'indice effectif en fonction de l'indice de réfraction n_2 de la couche guidante.

La figure 2.13 montre que l'indice effectif augmente de 2,858 à 3,195 puisque l'indice de réfraction de la couche guidante croit de 2,8 à 3,5.

- Evolution de l'indice effectif n_{eff} en fonction de la longueur d'onde λ avec $d = 0.2 \mu m$:

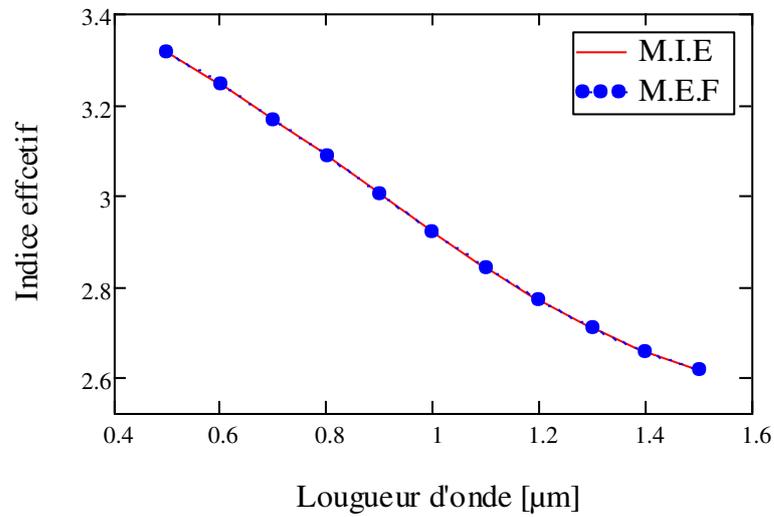


Figure 2.14. Variation de l'indice effectif en fonction de la longueur d'onde λ .

D'après cette figure, nous constatons que l'indice effectif décroît avec la longueur d'onde de 3,316 à 2,615 lorsqu'elle varie de 0,5 à 1,5 μm .

Les résultats des figures 2.12, 2.13, et 2.14 sont regroupés dans le tableau suivant :

Variation de l'indice effectif		
Avec l'épaisseur de la couche guidante de 0.1 à 2 μm	Avec l'indice de réfraction n_2 de 2,8 à 3.5	Avec la longueur d'onde de 0.5 à 1.5 μm
[2.482 – 3.439]	[2.858 – 3.195]	[3.316 – 2.615]

Tableau 2.3. Variation de l'indice effectif en mode TM.

- Evolution du facteur de confinement Γ en fonction de l'épaisseur d :

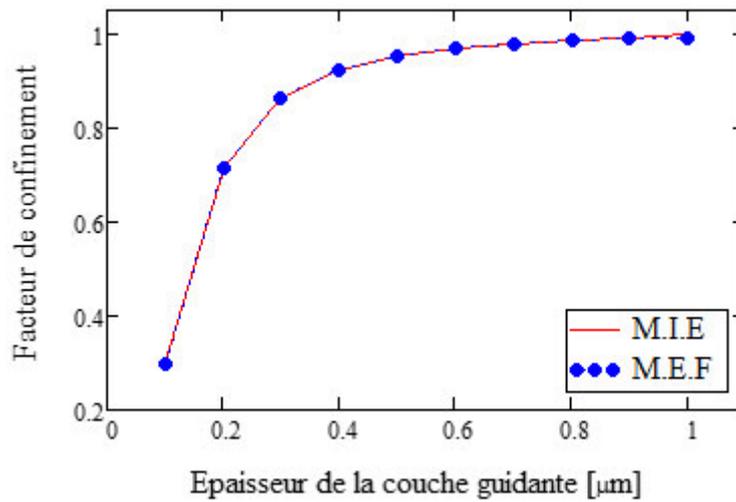


Figure 2.15. Variation du facteur de confinement Γ en fonction de l'épaisseur de la couche guidante n_2 .

D'après la figure 2.15, nous constatons que le facteur de confinement augmente de 0.299 à 0.992 lorsque l'épaisseur de la couche guidante augmente de 0,1 à 1 μm .

- Evolution du facteur de confinement Γ en fonction de l'indice de réfraction de la couche guidante n_2 avec $d = 0.5 \mu\text{m}$:

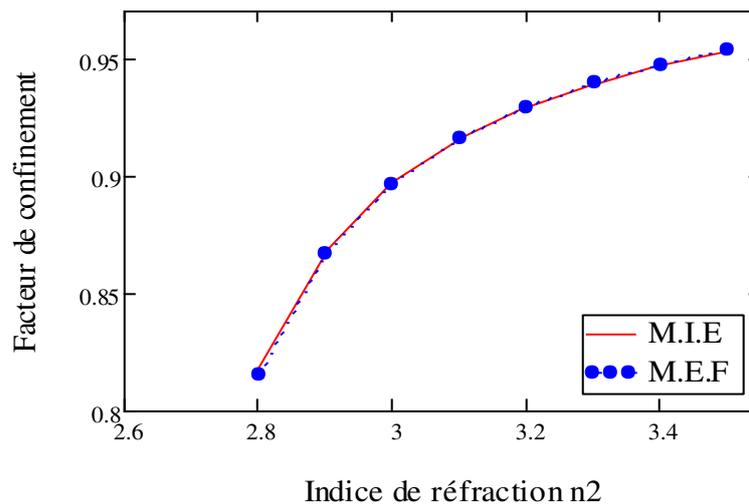


Figure 2.16. Variation du facteur de confinement Γ en fonction de l'indice de réfraction n_2 de la couche guidante.

D'après cette figure nous remarquons que le facteur de confinement augmente de 0,815 à 0,953 puisque l'indice de réfraction de la couche guidante croit de 2,8 à 3,5.

- **Evolution du facteur de confinement Γ en fonction de la longueur d'onde λ avec $d = 0,5 \mu\text{m}$:**

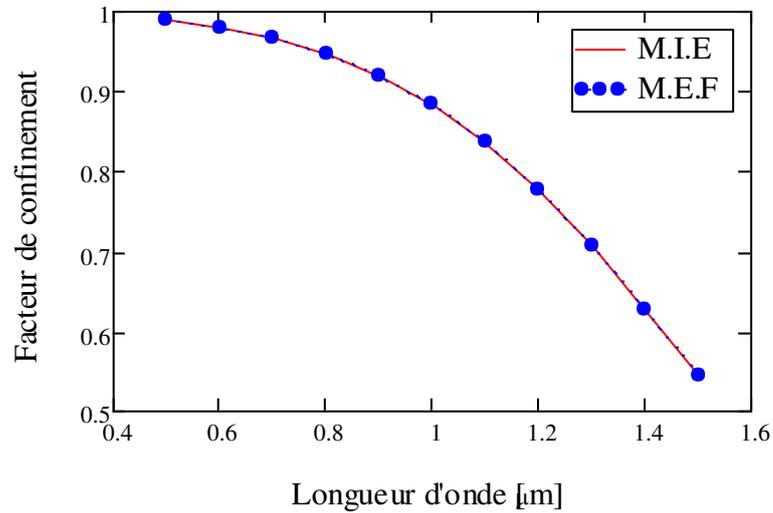


Figure 2.17. Variation du facteur de confinement Γ en fonction de la longueur d'onde λ .

D'après la figure précédente, nous remarquons que le facteur de confinement diminue de 0,989 à 0,544 quand la longueur d'onde *augmente de 0,5 à 1,5 μm* .

Les résultats des figures 2.15, 2.16, et 2.17 sont regroupés dans le tableau suivant :

Variation du facteur de confinement		
Avec l'épaisseur de la couche guidante de 0,1 à 1 μm	Avec l'indice de réfraction n_2 de 2,8 à 3,5	Avec la longueur d'onde de 0,5 à 1,5 μm
[0,299 – 0,992]	[0,815 – 0,953]	[0,989 – 0,544]

Tableau 2.4. Variation du facteur de confinement en mode TM.

b Guides symétriques

Dans cette partie, nous varions l'épaisseur de la couche guidante d , et l'indice de réfraction de la couche guidante n_2 , et la longueur d'onde λ , avec $n_1 = n_3 = 1,5$, $n_2 = 3,5$ et $\lambda = 1,5 \mu\text{m}$. Nous effectuons une série de simulations, afin de déterminer l'indice effectif et le facteur de confinement en mode TE et TM.

❖ Résolution en mode TE

- **Répartition du champ électrique E_y dans un guide symétrique 1D à trois couches en mode TE avec $d=2 \mu\text{m}$:**

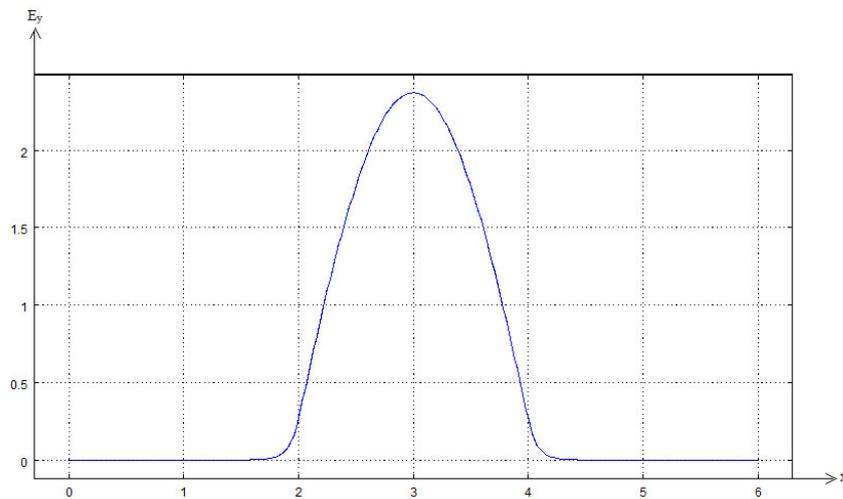


Figure 2.18. Répartition du champ électrique E_y dans un guide symétrique 1D à trois couches en mode TE.

Nous voyons que le champ électrique est confiné dans le guide.

- Evolution de l'indice effectif n_{eff} en fonction de l'épaisseur de la couche guidante d :

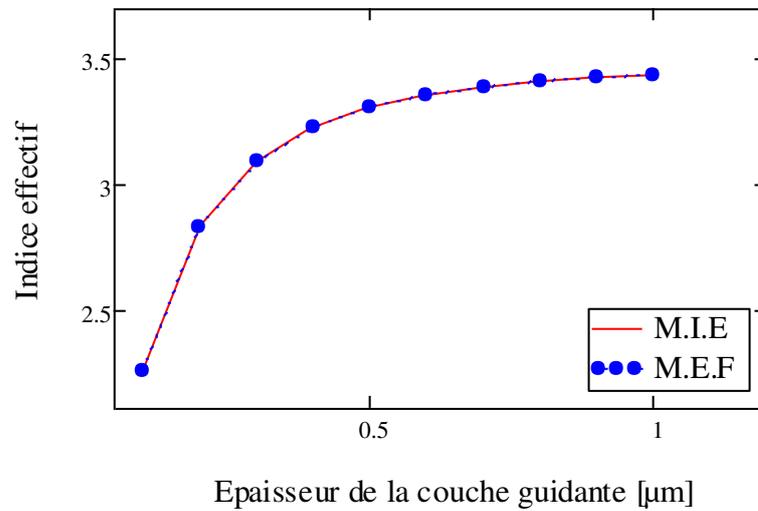


Figure 2.19. Variation de l'indice effectif en fonction de l'épaisseur d de la couche guidante.

Cette figure montre que l'indice effectif croit de 2,254 à 3,439 lorsque l'épaisseur de la couche guidante varie de 0,1 à 1 μm .

- Evolution de l'indice effectif n_{eff} en fonction de l'indice de réfraction de la couche guidante n_2 avec $d = 0.2 \mu\text{m}$:

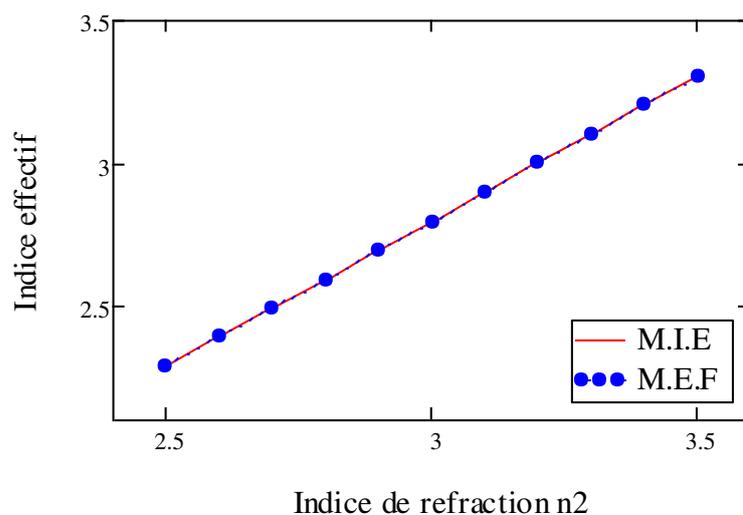


Figure 2.20. Variation de l'indice effectif en fonction de l'indice de réfraction de la couche guidante n_2 .

D'après cette figure, nous remarquons que l'indice effectif croit de 2,291 à 3,307 quand l'indice de réfraction de la couche guidante augmente de 2,8 à 3,5.

- Evolution de l'indice effectif n_{eff} en fonction de la longueur d'onde λ avec $d = 0,2\mu m$:

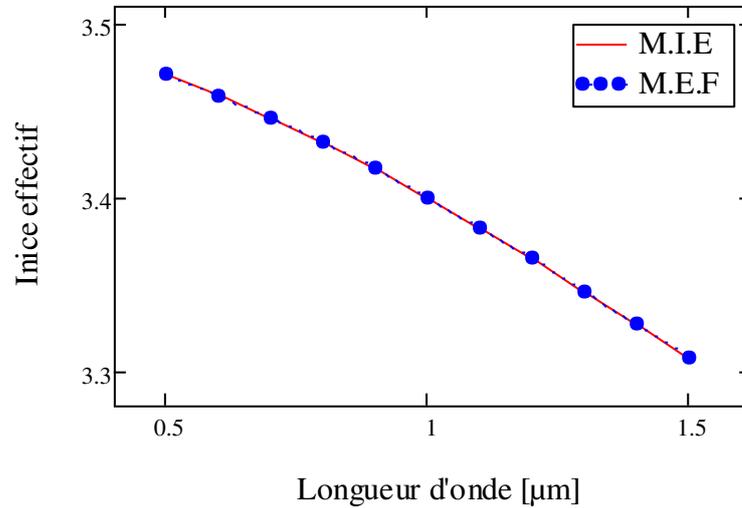


Figure 2.21. Variation de l'indice effectif en fonction de la longueur d'onde λ .

D'après cette figure, nous constatons que l'indice effectif décroît de 3,47 à 3,307 avec la longueur d'onde lorsqu'elle varie de 0,5 à 1,5 μm .

Les résultats des figures 2.19, 2.20, et 2.21 sont regroupés dans le tableau suivant :

Variation de l'indice effectif		
Avec l'épaisseur de la couche guidante de 0,1 à 1 μm	Avec l'indice de réfraction n_2 de 2,5 à 3,5	Avec la longueur d'onde de 0,5 à 1,5 μm
[2,254 – 3,439]	[2,291 – 3,307]	[3,47 – 3,307]

Tableau 2.5. Variation de l'indice effectif en mode TE.

- Evolution du facteur de confinement Γ en fonction de l'épaisseur d :

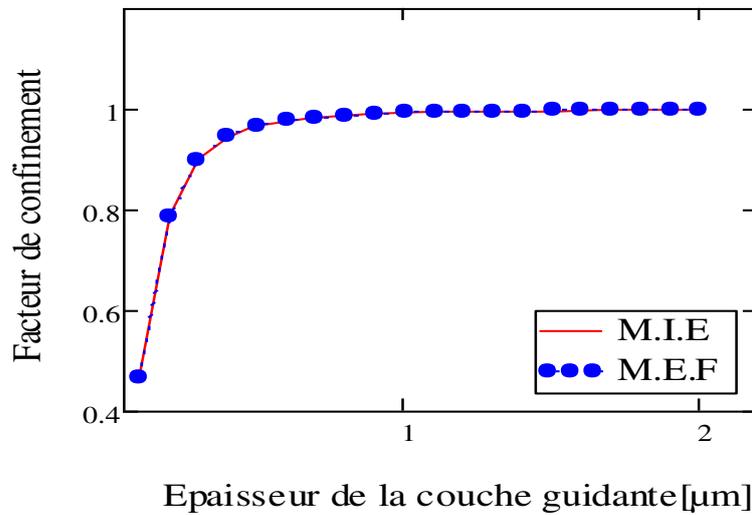


Figure 2.22. Variation du facteur de confinement Γ en fonction de l'épaisseur d de la couche guidante.

D'après la figure 2.22, nous voyons que le facteur de confinement augmente de 0,47 à 1 lorsque l'épaisseur de la couche guidante augmente de 0,1 à 2 μm , et il atteint son maximum lorsque $d=1\mu\text{m}$.

- Evolution du facteur de confinement en fonction de l'indice de réfraction de la couche guidante n_2 avec $d = 0.5\mu\text{m}$:

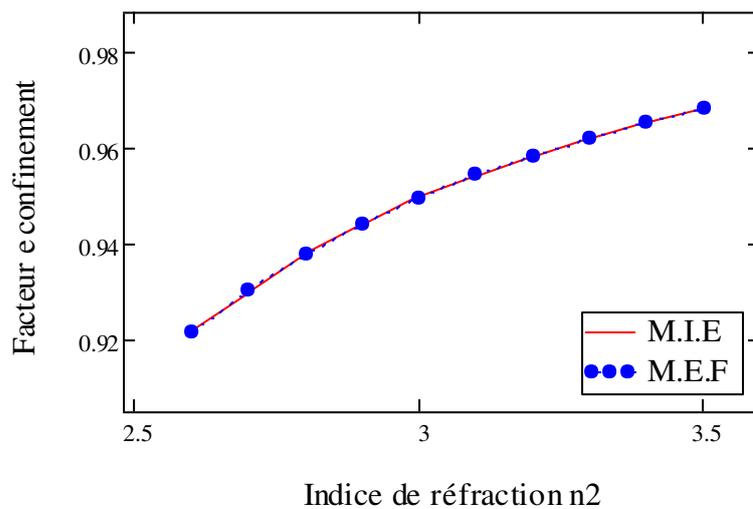


Figure 2.23. Variation du facteur de confinement Γ en fonction de l'indice de réfraction n_2 de la couche guidante.

Cette figure montre que le facteur de confinement augmente de 0,911 à 0,968 lorsque l'indice de réfraction de la couche guidante augmente de 2,8 à 3,5.

- Evolution du facteur de confinement Γ en fonction de la longueur d'onde λ avec $d = 0,5 \mu m$:

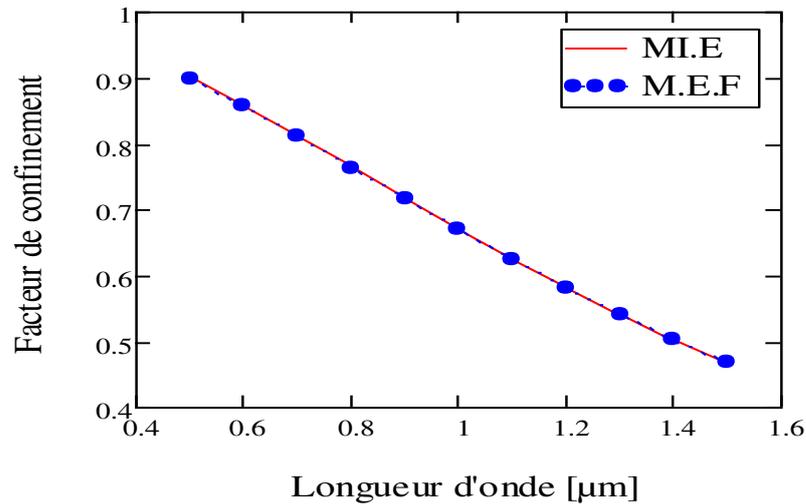


Figure 2.24. Variation du facteur de confinement Γ en fonction de la longueur d'onde λ .

Cette figure représente la diminution du facteur de confinement de 0,9 à 0,47 avec la longueur d'onde lorsqu'elle varie de 0,5 à 1,5 μm .

Les résultats des figures 2.22, 2.23, et 2.24 sont regroupés dans le tableau suivant :

Variation du facteur de confinement		
Avec l'épaisseur de la couche guidante de 0,1 à 2 μm	Avec l'indice de réfraction n_2 de 2,8 à 3,5	Avec la longueur d'onde de 0,5 à 1,5 μm
[0,47 – 1]	[0,911 – 0,968]	[0,9 – 0,47]

Tableau 2.6. Variation du facteur de confinement en mode TE.

❖ **Résolution mode TM**

- Répartition du champ H_y dans un guide symétrique 1D à trois couches en mode TM avec $d=2\mu\text{m}$:

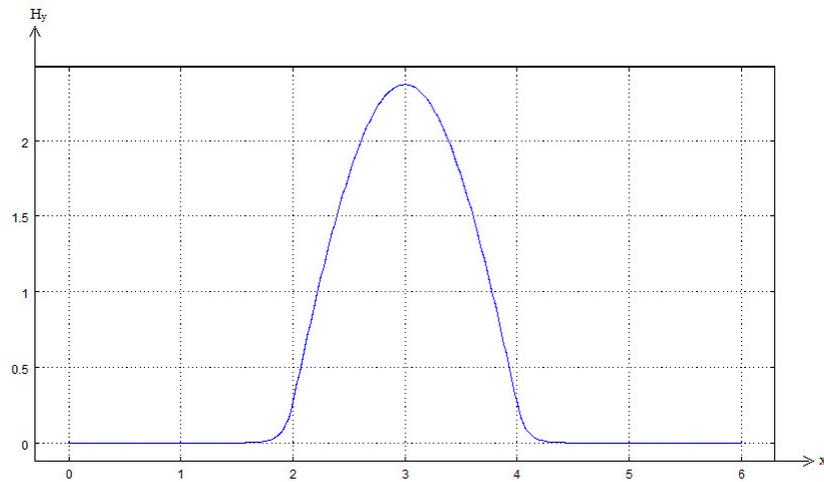


Figure 2.25. Répartition du champ magnétique H_y dans un guide symétrique 1D à trois couches en mode TM.

Nous remarquons que le champ magnétique est confiné dans le guide.

- Evolution de l'indice effectif n_{eff} en fonction de l'épaisseur de la couche guidante d :

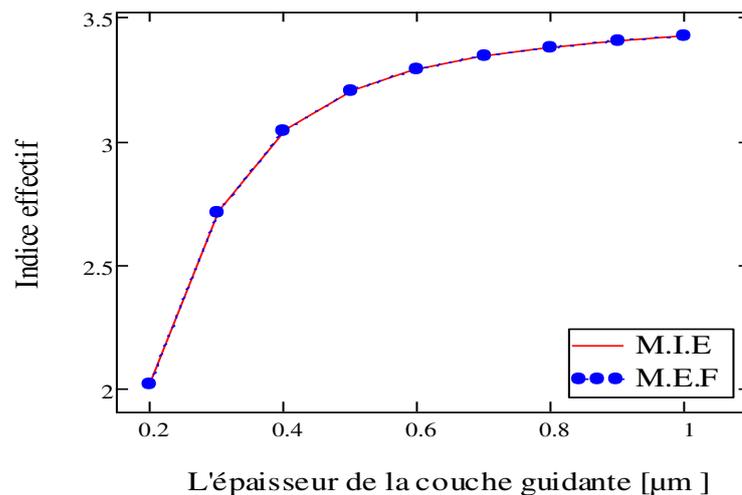


Figure 2.26. Variation de l'indice effectif en fonction de l'épaisseur d de la couche guidante

D'après la figure 2.26, nous voyons que l'indice effectif augmente de 1,654 à 3,423 lorsque l'épaisseur de la couche guidante augmente de 0,1 à $1\mu\text{m}$.

- Evolution de l'indice effectif n_{eff} en fonction de l'indice de réfraction de la couche guidante n_2 avec $d=0,2 \mu\text{m}$:

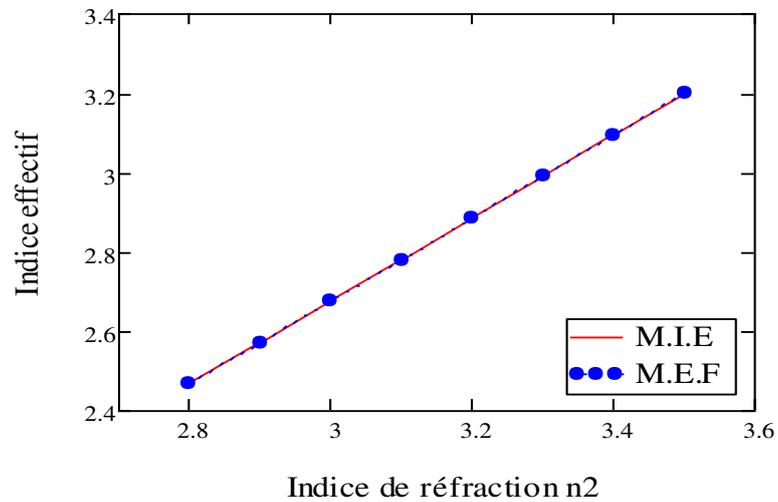


Figure 2.27. Variation de l'indice effectif n_{eff} en fonction de l'indice de réfraction n_2 de la couche guidante.

Cette figure montre que l'indice effectif croit de 2,27 à 3,202 lorsque l'indice de réfraction de la couche guidante augmente de 2,8 à 3,5.

- Evolution de l'indice effectif en fonction de la longueur d'onde λ avec $d = 0,5 \mu\text{m}$:

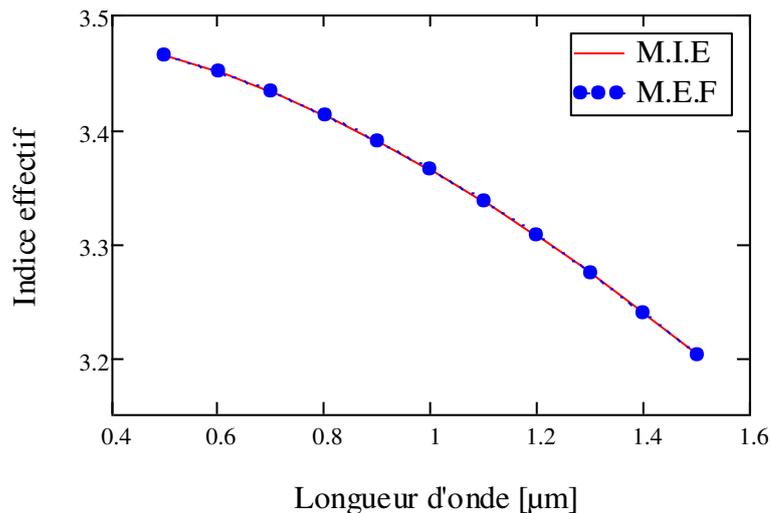


Figure 2.28. Variation de l'indice effectif n_{eff} en fonction de la longueur d'onde λ .

Cette figure montre que l'indice effectif décroît de 3,465 à 3,202 lorsque la longueur d'onde augmente de 0,5 à 1,5 μm .

Les résultats des figures 2.26, 2.27, et 2.28 sont regroupés dans le tableau suivant :

Variation de l'indice effectif		
Avec l'épaisseur de la couche guidante de 0,1 à 1 μm	Avec l'indice de réfraction n_2 de 2,8 à 3,5	Avec la longueur d'onde de 0,5 à 1,5 μm
[1,654 – 3,423]	[2,27 – 3,202]	[3,465 – 3,202]

Tableau 2.7. Variation de l'indice effectif en mode TM.

- **Evolution du facteur de confinement Γ en fonction de l'épaisseur d :**

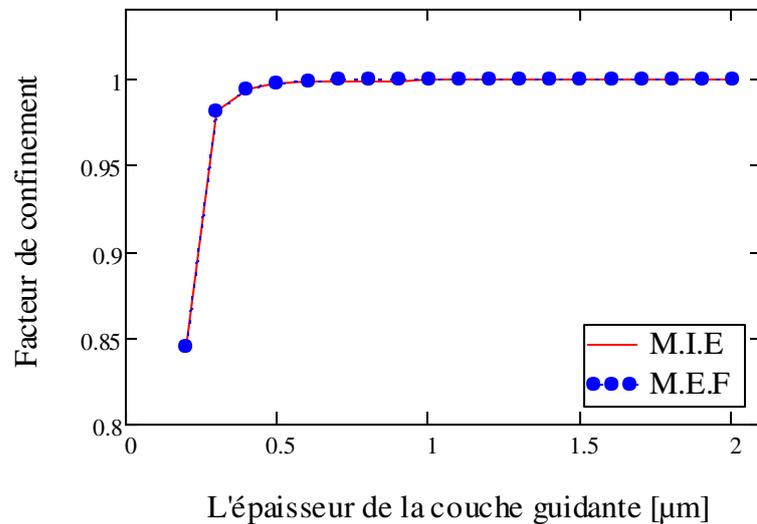


Figure 2.29. Variation du facteur de confinement Γ en fonction de l'épaisseur d de la couche guidante.

D'après cette figure, nous remarquons que le facteur de confinement croit de 0,854 à 1 quand l'épaisseur de la couche guidante croit de 0,2 à 2 μm , et il atteint son maximum lorsque $d=0,5 \mu m$.

- Evolution du facteur de confinement Γ en fonction de l'indice de réfraction de la couche guidante n_2 avec $d = 0,5\mu m$:

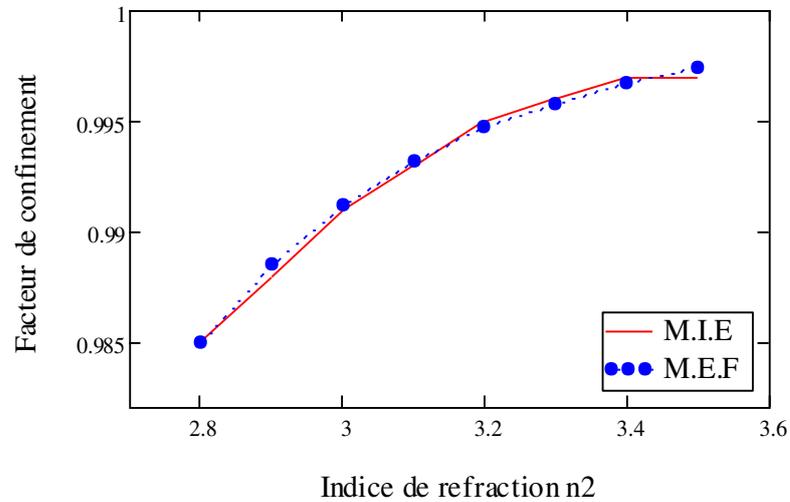


Figure 2.30. Variation du facteur de confinement Γ en fonction de l'indice de réfraction n_2 de la couche guidante.

Cette figure montre que le facteur de confinement augmente de 0,985 à 0,997 lorsque l'indice de réfraction de la couche guidante augmente de 2,8 à 3,5.

- Evolution du facteur de confinement Γ en fonction de la longueur d'onde λ avec $d = 0,5\mu m$:

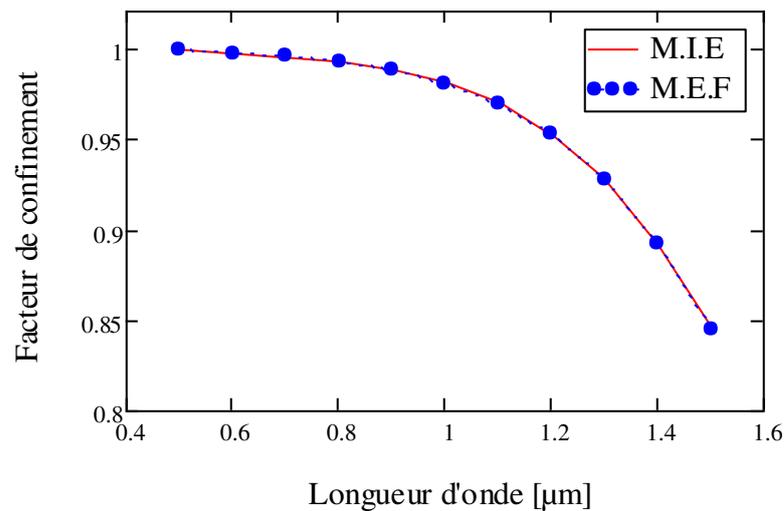


Figure 2.31. Variation du facteur de confinement Γ en fonction de la longueur d'onde λ .

D'après la figure 2.31, nous constatons que le facteur de confinement décroît de 0,999 à 0,845, lorsque la longueur d'onde varie de 0,5 à 1,5 μm .

Les résultats des figures 2.29, 2.30, et 2.31 sont regroupés dans le tableau suivant :

Variation du facteur de confinement		
Avec l'épaisseur de la couche guidante de 0,2 à 2 μm	Avec l'indice de réfraction n_2 de 2,8 à 3,5	Avec la longueur d'onde de 0,5 à 1,5 μm
[0,854 – 1]	[0,985 – 0,997]	[0,999 – 0,845]

Tableau 2.8. Variation du facteur de confinement en mode TM.

2.3.3 Résultats de la simulation de guide optique plan à cinq couches

La figure suivante représente un guide optique rectangulaire à 5 couches :

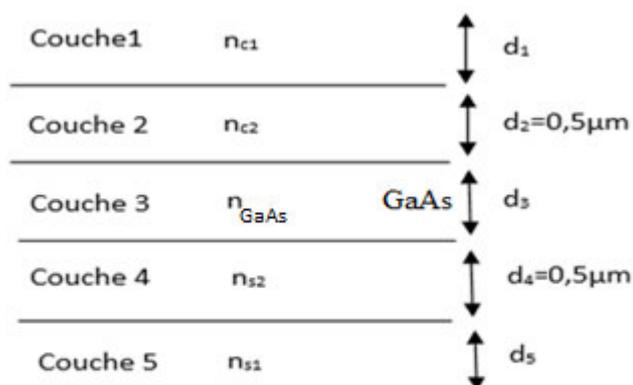


Figure 2.32. Structure du guide optique à cinq couches.

Avec : $n_{c1} = n_{s1} = 1,5$, $n_{c2} = n_{s2} = 2$, et $n_{GaAs} = 3,5$, pour une longueur d'onde $\lambda = 1,5\mu\text{m}$.

- Evolution de l'indice effectif en fonction de l'épaisseur de la couche guidante d :

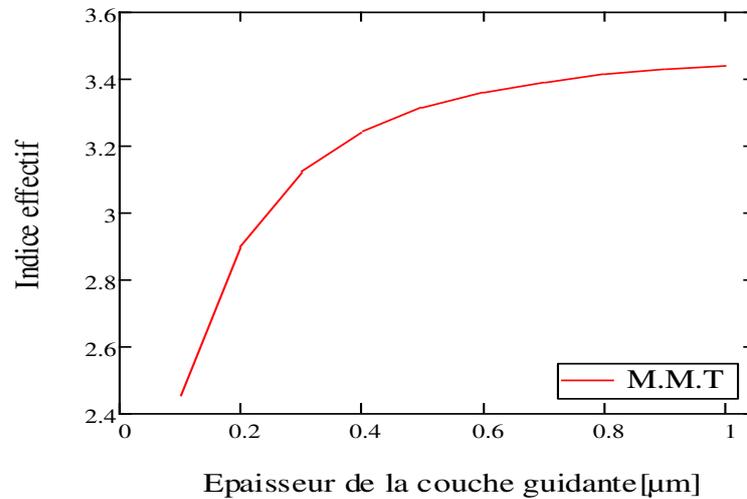


Figure 2.33. Variation de l'indice effectif n_{eff} en fonction de l'épaisseur d de la couche guidante.

Nous voyons que l'indice effectif croit de 2,455 à 3,441 μm , lorsque d varie de 0,1 à 1 μm .

2.4 Interprétation des résultats

Les résultats obtenus dans cette étude sur les guides plans sont rassemblés dans les figures précédentes. A ces dernières, on peut adjoindre les commentaires suivants :

- L'indice effectif dans les guides plans à trois couches croit avec l'épaisseur de la couche guidante d et l'indice de réfraction n_2 , par contre il décroît avec la longueur d'onde, dans les deux types asymétrique et symétrique pour les deux modes TE et TM.
- Le facteur de confinement croit aussi avec l'épaisseur de la couche guidante d , et l'indice de réfraction de la couche guidante n_2 , et décroît avec la longueur d'onde.
- Les résultats de l'indices effectif et du facteur de confinement en mode TE sont légèrement élevés que ceux en mode TM.
- Pour le guide plan à 5 couches, l'indice effectif croit avec l'épaisseur de la couche guidante en mode TE.
- On constate que les résultats des deux méthodes sont concordants.

2.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons fait une étude unidimensionnelle des guides optiques plans à trois couches et des guides optiques plans à N couches, en utilisant trois méthodes numériques à cause de non linéarité de l'équation d'onde qui rend impossible sa résolution analytique :

- La méthode de l'indice effectif à une dimension (pour guide à 3 couches).
- La méthode des matrices de transfert (pour guide à N couches).
- La méthode des éléments finis.

On conclut que :

- Le confinement optique dépend de l'épaisseur et de la composition de la couche guidante, ainsi que de la longueur d'onde.
- lorsque l'indice effectif est grand le confinement est bon.

Chapitre 3 Guide optiques à deux dimensions

3.1 Introduction

Dans les dernières années, une analyse numérique exacte des guides d'ondes optiques est devenue indispensable pour l'étude optimale des appareils optiques et des circuits intégrés optiques. Depuis, des tentatives ont été faites pour obtenir des solutions numériques plus rigoureuses, sur des sections (cross-section) bidimensionnelles des guides d'onde optiques.

Dans ce chapitre, nous présenterons une étude bidimensionnelle d'un guide optique rectangulaire avec la méthode de l'indice effectif, puis une simulation d'un guide à base des matériaux Si/SiO_2 , et une comparaison entre trois types de guides optiques à deux dimensions à base Si/SiO_2 est effectuées.

Enfin, nous terminerons par l'interprétation des résultats obtenus et une conclusion.

3.2 Théorie

3.2.1 Définition

Le guide d'onde étudié est un guide d'onde optique à double confinement latérale rectangulaire (figure 3.1). La configuration la plus simple d'un guide d'onde est un empilement de trois couches de matériaux d'indices de réfraction différents.

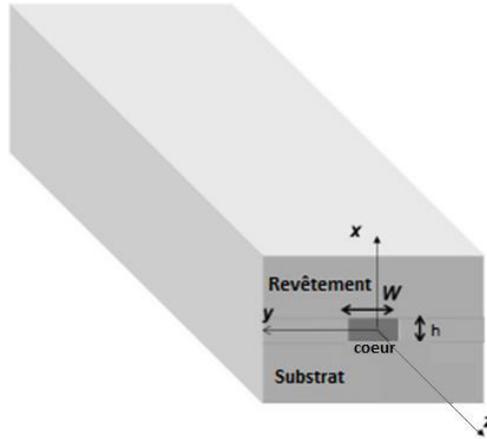


Figure 3.1. Guide rectangulaire.

3.2.2 Méthode de l'indice effectif à deux dimensions

Ici nous présentons la méthode de l'indice effective, qui nous permet d'analyser une structure de guide d'ondes optique bidimensionnelle en la divisant en deux guides à une dimension plus simple à résoudre [11].

La figure 3.2. Montre un exemple d'un guide d'ondes optique 2D et illustre le concept de la méthode de l'indice effectif. On considère l'équation d'onde scalaire :

$$\frac{\partial^2 \phi(x,y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi(x,y)}{\partial y^2} + k_0^2 (n^2(x,y) - n_{eff}^2) \phi(x,y) = 0 \quad (3.1)$$

Où n_{eff} est l'indice effectif à déterminer. Nous séparons la fonction d'onde $\phi(x,y)$ en deux fonctions :

$$\phi(x,y) = f(x) \cdot g(y) \quad (3.2)$$

Ceci correspond à la supposition qu'il n'y a aucune interaction entre les variables x et y . En substituant l'équation 3.2 dans l'équation 3.1 et en divisant par la fonction d'onde, nous obtenons :

$$\frac{1}{f(x)} \cdot \frac{d^2 f(x)}{dx^2} + \frac{1}{g(y)} \cdot \frac{d^2 g(y)}{dy^2} + k_0^2 (n^2(x,y) - n_{eff}^2) = 0 \quad (3.3)$$

En posant la somme du deuxième et troisième terme de l'équation 3.3 égale à $k_0^2 N^2(x)$.

On obtient :

$$\frac{1}{g(y)} \frac{d^2 g(y)}{dy^2} + k_0^2 n^2(x, y) = k_0^2 N^2(x) \quad (3.4)$$

C'est-à-dire la somme du premier et du quatrième terme égale à $-k_0^2 N^2(x)$:

$$\frac{1}{f(x)} \frac{d^2 f(x)}{dx^2} - k_0^2 n_{eff}^2 = -k_0^2 N^2(x) \quad (3.5)$$

Après cette dernière procédure on obtient deux équations indépendantes :

$$\frac{d^2 g(y)}{dy^2} - k_0^2 [n^2(x, y) - N^2(x)] g(y) = 0 \quad (3.6)$$

Et

$$\frac{d^2 f(x)}{dx^2} + k_0^2 (N^2(x) - n_{eff}^2) f(x) = 0 \quad (3.7)$$

Où N : Indice effectif suivant y .

n_{eff} : Indice effectif total.

n : Indice de réfraction du milieu.

La détermination de l'indice effectif peut se résumer comme suit :

- (i) Comme il est indiqué dans la figure 3.2. en remplaçant le guide optique 2D par une combinaison de guides optiques 1D.
- (ii) Pour chaque guide optique 1D, nous calculons l'indice effectif suivant l'axe y .
- (iii) Considérer un guide optique planaire, par placer les indices effectifs calculés dans l'étape (ii) le long de l'axe des abscisses x .
- (iv) Calculer l'indice effectif de la structure en considérant le guide 1D de l'étape (iii).

Il est à noter que, pour le mode TE du guide d'ondes optique 2D, nous faisons d'abord l'analyse de mode TE et l'analyse de mode TM. Pour l'analyse du mode TM du guide d'onde optique 2D, nous inversons l'ordre des analyses.

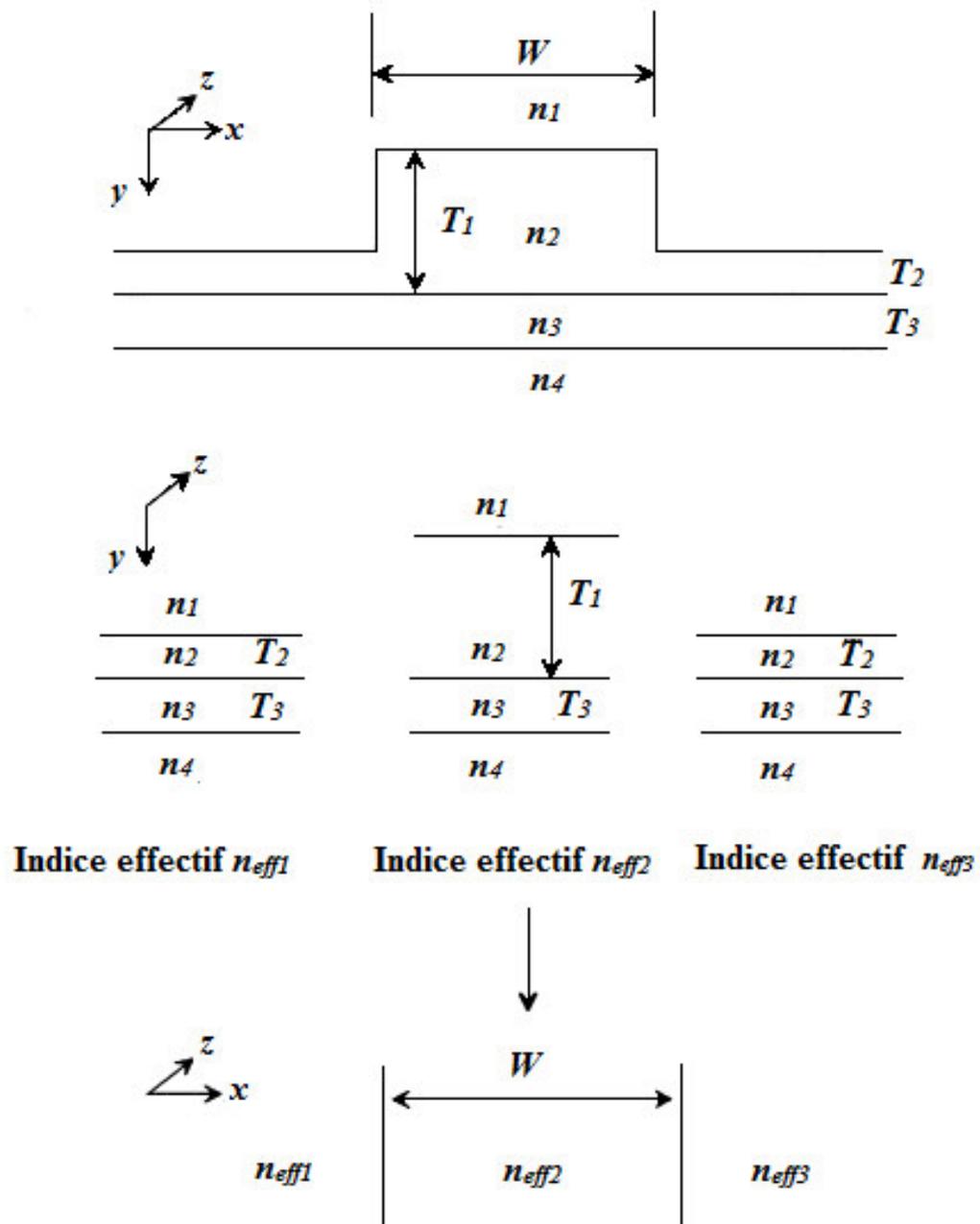


Figure 3.2. Concept de la méthode de l'indice effectif à deux dimensions.

3.3 Simulations

Dans cette partie, nous présentons les résultats de simulation des différents exemples des guides optiques à deux dimensions. Dans un premier temps, nous décrivons la méthode des éléments finis utilisée pour déterminer l'indice effectif et le facteur de confinement par le logiciel comsol. Ensuite, nous exposons les différents résultats obtenus de l'indice effectif et du facteur de confinement.

3.3.1 Méthode des éléments finis à deux dimensions

La solution des problèmes scientifique passe par une représentation mathématique des phénomènes mis en jeux. Ces phénomènes sont en générale multiples et compliqués. Pour les représenter, on est amené à négliger certains phénomènes et à simplifier certains autres. Même avec ces simplifications, les équations obtenues sont souvent insolubles par les méthodes algébriques connues. Il est alors nécessaire d'avoir recours à des méthodes numériques.

Pour notre cas, Le principe consiste à utiliser la méthode des éléments finies à deux dimensions pour passer du système continu au système discret et linéariser notre équation d'onde et enfin résoudre le système linéaire obtenu en utilisant l'une des méthodes itératives classique connues adaptées aux grands systèmes dont la matrice est très creuse.

La méthode des éléments finis (MEF) est une manière numérique de résoudre certains problèmes de physique. C'est une méthode qui permet de déterminer une solution approchée sur un domaine spatial, c'est-à-dire qui permet de calculer un champ (de scalaires, de vecteurs, de tenseurs) qui correspond à certaines équations et à certaines conditions imposées.

La méthode consiste à découper le domaine spatial en petits éléments, également appelés mailles, et à rechercher une formulation simplifiée du problème sur chaque élément, c'est-à-dire à transformer le système d'équations quelconque en un système d'équations linéaires. Chaque système d'équations linéaires est représenté par une matrice. Les systèmes d'équations pour tous les éléments sont ensuite rassemblés, ce qui forme une grande matrice ; la résolution de ce système global donne la solution approchée au problème.

3.3.2 Résultats des simulations

a Guide optique rectangulaire à deux dimensions (Rib) à base Si/SiO₂

La figure 3.3 représente un guide Rib avec un cœur (Si), d'indice de réfraction $n_2 = 3,5$, de largeur w , et d'une hauteur h , avec ($w \neq h$), limité par un substrat et une couverture de l'oxyde de silicium (SiO₂) d'indice de réfraction $n_1 = 1,5$. Les indices de réfraction des trois couches sont valables pour une longueur d'onde de $\lambda = 1,5 \mu\text{m}$.

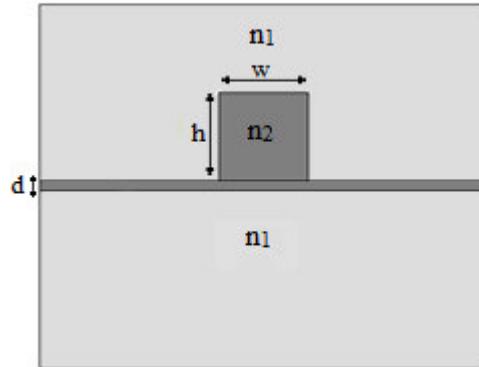


Figure 3.3. Guide Rib à base de Si/SiO₂

Dans notre travail, nous varions la hauteur h et largeur w , et nous effectuons une série de simulations.

- Evolution de l'indice effectif en fonction de la hauteur h avec $w = 1 \mu\text{m}$:

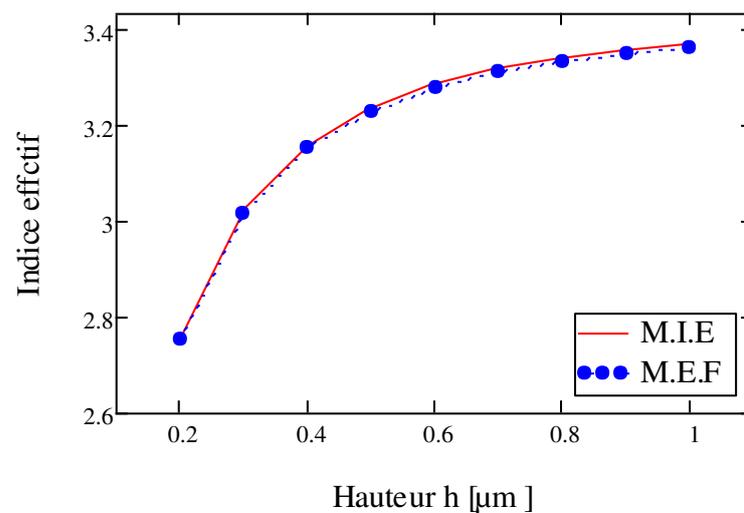


Figure 3.4. Variation de l'indice effectif en fonction de la hauteur h .

- Evolution de l'indice effectif en fonction de la largeur w avec $h=0.2\mu\text{m}$:

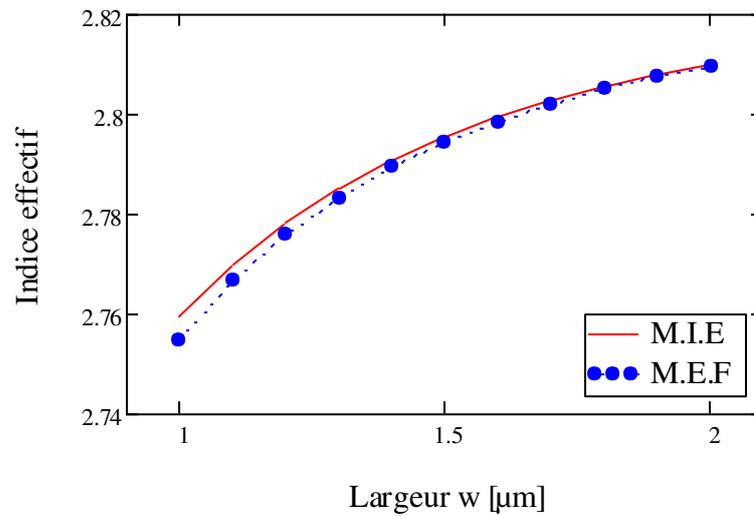


Figure 3.5. Variation de l'indice effectif en fonction de la largeur w .

D'après les figures 3.4 et 3.5, nous constatons que :

- L'indice effectif croit avec la hauteur et la largeur du cœur.
- De plus, on voit que les résultats des deux méthodes MIE et MEF sont similaires, sachant que cette dernière est plus précise.

- Evolution du facteur de confinement en fonction de la hauteur h avec $w=1\mu\text{m}$:

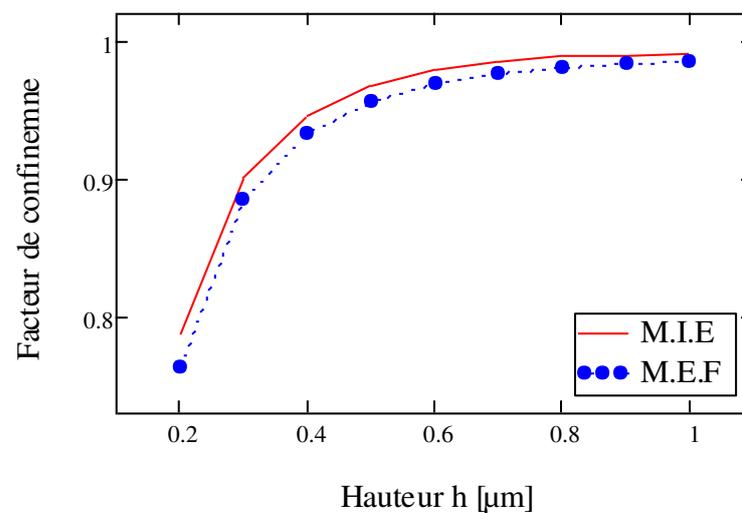


Figure 3.6. Variation du facteur de confinement en fonction de la hauteur h .

- **Evolution du facteur de confinement en fonction de la largeur w avec $h=0,2\mu\text{m}$:**

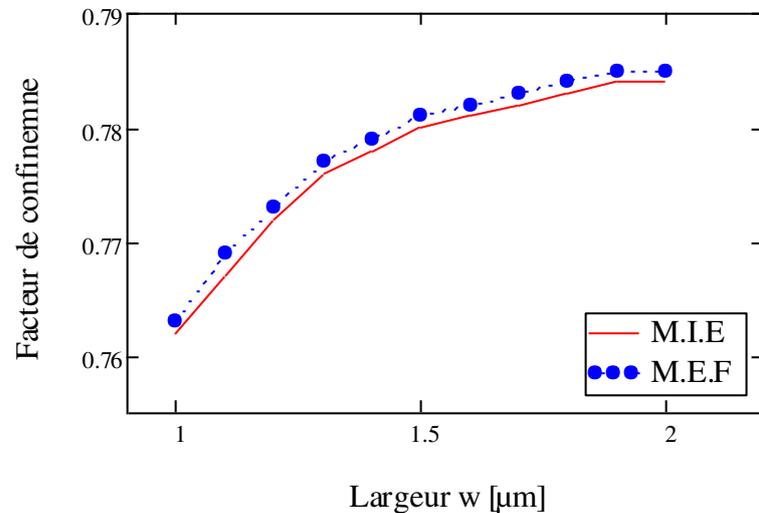


Figure 3.7. Variation du facteur de confinement en fonction de la largeur w .

Les figures 3.6 et 3.7 illustrent que :

- Le facteur de confinement croit avec la hauteur et la largeur du cœur.
- De plus, on voit que les résultats des deux méthodes MIE et MEF sont similaires, sachant que cette dernière est plus précise.

b Comparaison entre trois guides 2D (Buried Channel, Rib , Ridge) :

Dans cet exemple, nous comparons trois guides à deux dimensions à base de Si/SiO_2 illustrés dans la figure 3.8. Le premier guide (structure a) est un guide Buried Channel d'un cœur entouré par un revêtement formé de SiO_2 . Le deuxième (structure b) est un guide Rib comme le guide du premier exemple, mais dans ce cas la hauteur et la largeur du cœur sont égales ($w = h$), et le troisième guide (structure c) est un guide Ridge. Les structures sont infinies dans la direction de propagation (axe z). La simulation numérique est réalisée uniquement dans le plan (x, y) . On considère une section carrée du cœur ($w = h$) pour les trois guides.

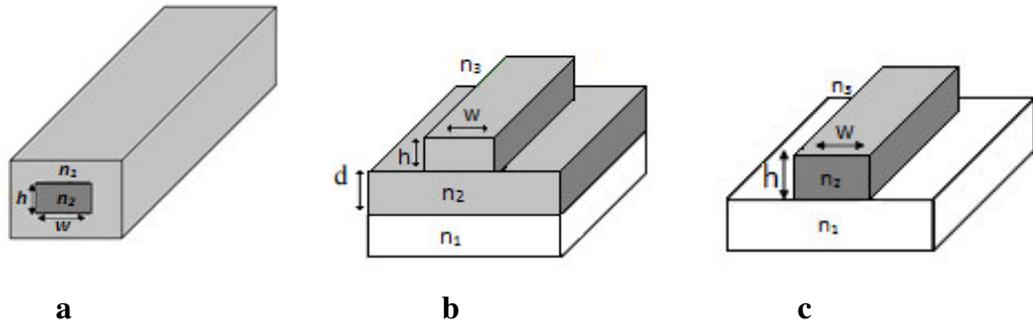


Figure 3.8. Structures des trois guides.

Pour comparer les caractéristiques des guides mentionnés, nous avons représenté la variation de l'indice effectif et du facteur de confinement en fonction des dimensions du cœur des trois guides.

Le tableau suivant représente les paramètres utilisés pour les trois structures:

Type des guides	$n_1(\text{SiO}_2)$	$n_2(\text{Si})$	$n_3(\text{air})$	$\lambda(\mu\text{m})$	$w=h(\mu\text{m})$	$d(\mu\text{m})$
Buried channel	1,5	3,5	-	1,5	[0,1 - 1]	-
Rib	1,5	3,5	1	1,5	[0,1 - 1]	0,1
Ridge	1,5	3,5	1	1,5	[0,1 - 1]	-

Tableau 3.1. Paramètres des trois guides.

Avec n_1, n_2, n_3 : Indices de réfractions.

λ : longueur d'onde.

h : la hauteur du cœur.

w : la largeur du cœur.

d : l'épaisseur.

Les figures suivantes représentent la répartition du champ électrique dans les 3 structures étudiées :

- Répartition du champ électrique dans la structure a :

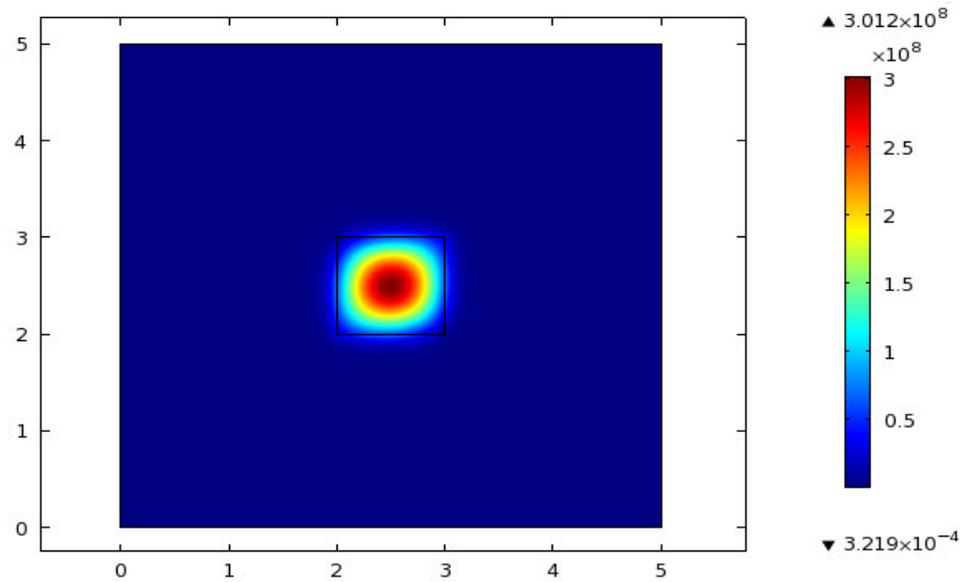


Figure 3.9. Répartition du champ électrique dans le guide Burried Channel.

- Répartition du champ électrique dans la structure b :

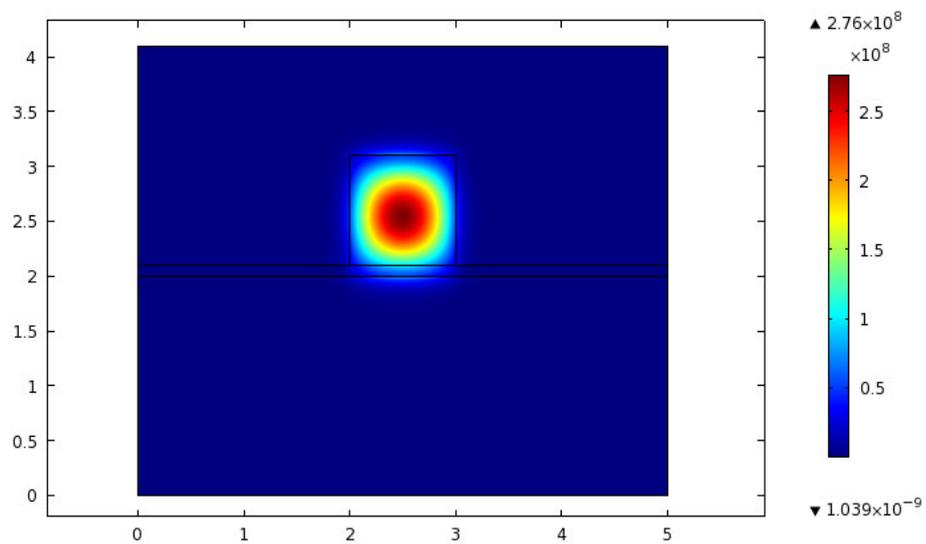


Figure 3.10. Répartition du champ électrique dans le guide Rib.

b.3 Répartition du champ électrique dans la structure c :

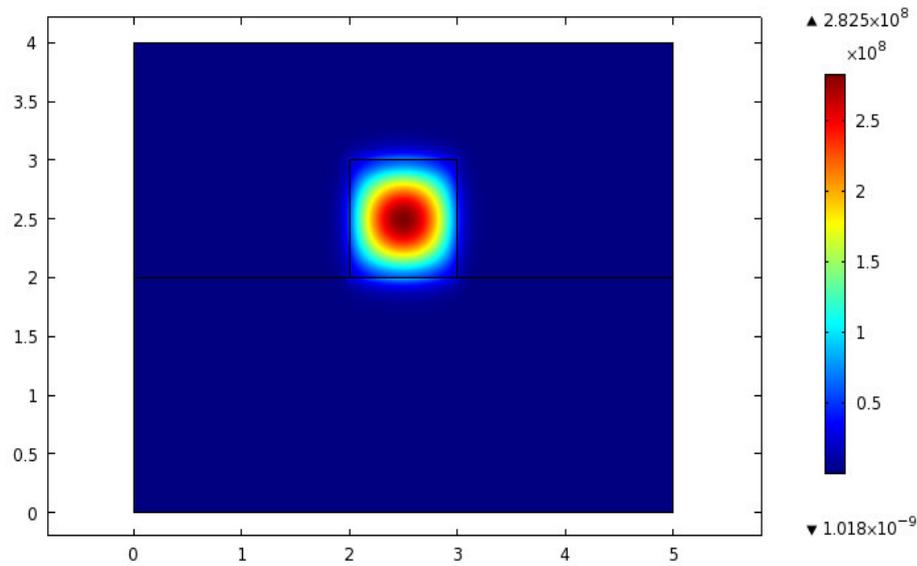


Figure 3.11. Répartition du champ électrique dans le guide Ridge.

D'après les figures 3.9, 3.10 et 3.11 nous constatons que les composantes du champ électriques sont bien confinées et les pertes sont faibles puisque les trois guides assurent le confinement de la lumière dans les deux directions transverses.

b.4 Evolution de l'indice effectif en fonction de la largeur w et de la hauteur h dans les trois structures :

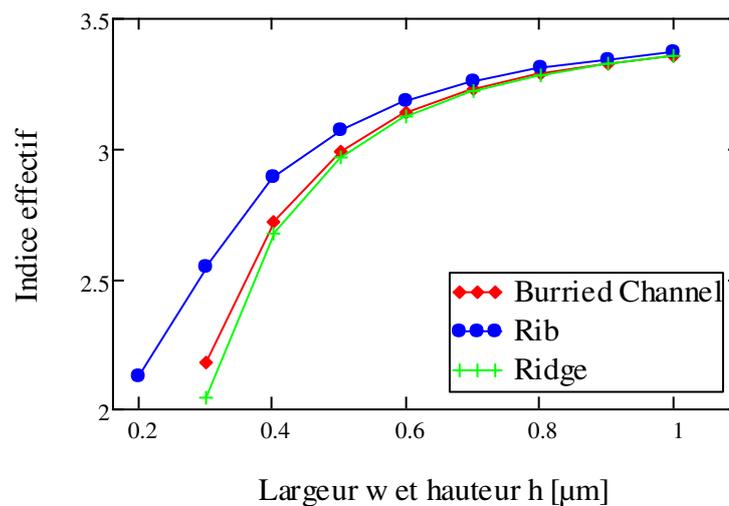


Figure 3.12. Variation de l'indice effectif en fonction de h et w dans les 3 structures.

Cette figure montre que :

- L'indice effectif croit d'une manière monotone avec la largeur w et la hauteur h dans les trois structures.
- L'indice effectif du guide Rib est le plus élevé

b.5 Evolution du facteur de confinement en fonction de la largeur w et la hauteur h dans les trois structures :

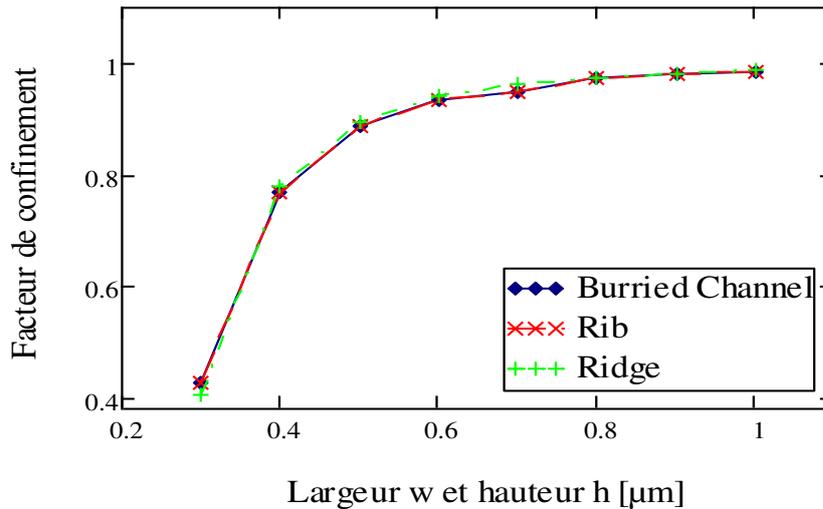


Figure 3.13. Variation du facteur de confinement en fonction de h et w dans les 3 structures.

D'après la figure 3.13, nous constatons que :

- Le facteur de confinement croit d'une manière monotone avec la hauteur h et la largeur w dans les trois structures.
- Les facteurs de confinement dans les trois guides sont presque identiques.

3.4 Interprétation des résultats

Les résultats obtenus dans le premier exemple qui était un guide rectangulaire à deux dimension Rib à base Si/SiO_2 avec ($h \neq w$) montrent que l'indice effectif et le facteur de confinement croient avec la hauteur et la largeur du cœur, et que l'accord entre les méthodes MIE et MEF est globalement bon, même si cette dernière est plus précise.

De l'étude comparative des trois structures, on peut conclure :

- L'indice effectif croit d'une façon monotone avec la hauteur et la largeur du cœur.

- Le facteur de confinement croît d'une façon monotone aussi avec la hauteur et la largeur du cœur.
- La structure rib présente l'indice effectif le plus élevé.
- Les trois structures assurent un bon confinement.

3.5 Conclusion

Dans ce chapitre, des simulations portant sur trois types des guides bidimensionnels, en utilisant deux méthodes différentes, ont été réalisées. Les résultats de ces simulations montrent que les dimensions du cœur jouent un rôle très important dans les caractéristiques du guide : indice effectif et facteur de confinement. D'autre part, les résultats obtenus par les deux méthodes sont très proches bien que la méthode de l'indice effectif est une méthode approximative moins précise.

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce projet de fin d'études a porté sur l'étude, et la simulation des guides optiques, à une et à deux dimensions.

Le premier chapitre, décrit brièvement quelques généralités sur les guides optiques, en commençant par les ondes électromagnétiques. Ensuite, la théorie des guides optiques a été citée brièvement.

Le second chapitre présente l'étude des guides optiques plans 1D avec la méthode de l'indice effectif pour les guides à trois couches, et la méthode des matrices de transfert pour les guides à N couche. Une simulation des exemples de ces guides à l'aide de deux logiciels de simulation, qui sont matchad et comsol est réalisée pour déterminer les caractéristiques des guides plans, comme l'indice effectif et le facteur de confinement.

Enfin, le troisième chapitre présente l'étude des guides optiques 2D avec la méthode de l'indice effectif, puis la simulation d'un guide rectangulaire à deux dimensions à base du matériau Si/SiO_2 par les deux logiciels précédents. Une comparaison entre trois structures de guides à deux dimensions à l'aide du logiciel de simulation comsol, pour déterminer leurs caractéristiques comme l'indice effectif et le facteur de confinement a été effectuée.

D'après les simulations réalisées on peut conclure :

- L'indice effectif et le facteur de confinement augmentent avec les dimensions du guide.
- L'indice effectif et le facteur de confinement augmentent avec l'indice du guide.
- L'indice effectif et le facteur de confinement diminuent avec la longueur d'onde.

- La méthode de l'indice effectif a un faible temps de calcul mais une faible précision pour les faibles dimensions géométriques des guides.
- La méthode des matrices de transfert a un faible temps de calcul et une bonne précision.
- La méthode des éléments finis a un temps de calcul grand mais en contrepartie la précision est très bonne.

Les résultats de ce travail peuvent être utilisés dans l'étude de composants plus complexes comme les coupleurs, les multiplexeurs, les lasers et bien d'autres composants optoélectroniques.

Bibliographie

- [1] <http://docplayer.fr/9603142-Optique-guidee-1-1-introduction-1-2-le-niobate-de-lithium-un-cristal-extraordinaire-1-2-1-presentation-du-cristal-a-aspects-historiques.html>
- [2] A.GHERFI, Thèse de magistère, "Étude de la propagation de l'onde élastique dans les corps continus", juin 2006.
- [3] S.AMMI, Thèse de magistère, "Etude d'un guide de lumière à deux dimensions ", septembre 2001.
- [4] <http://hal-sfo.ccsd.cnrs.fr/file/index/docid/442974/filename/IOGcoursInteg.pdf>
- [5] <http://www.fsg.ulaval.ca/opus/physique534/resumes/13c.shtml>.
- [6] M.ALONSO, E.J.FINN, « Physique Générale, Champs et Ondes », tom 2, 1986.
- [7] T.V.NEERDEN, « Les équations de Maxwell expliquées simplement », article, Lundi 02 février 2015.
- [8] V.RENVOISE, E.BELLANGER, R.GIRARDI, S.PAULI, B.PORTELLI, E.SAUDRAIS, « Physique PC-PC* .Cap prépa 2ème année - Cours complet avec tests, exercices et problèmes corrigés », 2010.
- [9] Encyclopédie universalise, Edition 2000.
- [10] E.ARGENCE, Th.KAHAN : « Théorie des guides et cavités électromagnétiques », 1963.
- [11] F.BOUBEKRI, S.CHIKHA AMARA, « Etude et dimensionnement d'un guide d'onde en arête à base du matériau (SiO_xN_y) », Mémoire de master, Université KASDI MERBAH Ouargla, 2014.
- [12] K.KAWANO, T.KITOH, « Introduction to Optical waveguide Analysis: Solving Maxwell's Equations and the Schrödinger Equation », John Wiley, Sons, Inc., 2001.
- [13] Irène, M. Joindot : « Les télécommunications par fibres optiques », 1996.
- [14] T.TANAKA, Y.SUEMATSU, « An exact analysis of cylindrical fiber with index by matrix method and its application to focusing fiber, Trans ».Inst. Electronics, 1976.

[15] K. KAWANO, « Introduction and Application of Optical Coupling Systems to Optical Devices», Gendai Kohgakusha, 2nd ed, Tokyo, 1998.

[16] <https://www.comsol.fr/wave-optics-module>.