
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 البلدية
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك
Département d'Électronique



Mémoire de Master

Mention Électronique
Spécialité Micro-optoélectronique

présenté par

Garoudja Meriem

&

Mostefaoui Loubna

Etude d'un guide de lumière Slot

Proposé par : Mr. Nacer Saïd

Année Universitaire 2015-2016

Dédicace

A Mon père, qui peut être fier de trouver ici le résultat de longues années de sacrifices et de privations pour m'aider à avancer dans la vie. Puisse Dieu faire en sorte que ce travail porte son fruit ; Merci pour l'amour, les valeurs nobles, l'éducation et le soutien permanent venu de toi

A Ma mère, qui a souffert pour ma réussite, je la remercie pour son amour, son soutien, tous les sacrifices consentis et ses précieux conseils, pour toute son assistance et sa présence dans ma vie, que ce travail aussi modeste soit l'expression de mes sentiments et de mon éternelle gratitude

A Mes sœurs Fatma Zohra, Selma et Khadidja qui n'ont cessé d'être pour moi des exemples de persévérance, de courage et de générosité « Merci pour votre amour »

A ma meilleure amie d'enfance Amina

« Merci pour tous ces jours où tu as été à mes côtés »

Ames adorables petits neveux Mohamed et Yusef

A mon binôme Mostefaoui Loubna et tous mes amis

Garoudja Meriem

Remerciements

Tout d'abord nous remercions ALLAH le tout puissant, de nous avoir donné le courage, la volonté, et la patience de mener ce présent travail.

Nous voudrions exprimer nos remerciements les plus sincères à notre encadreur, M^r NACER SAID, qui nous a beaucoup aidés dans notre travail.

Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury pour avoir accepté d'examiner notre travail et de l'enrichir par leurs propositions.

Nous remercions aussi tous à nos professeurs qui nous ont soutenus durant notre formation à l'université USDB.

Enfin, nous désirons remercier nos familles et nos amis et camarades qui nous ont apporté leur soutien incessant pendant toute la durée de travail.

ملخص:

في هذا العمل لقد صببنا اهتمامنا على دراسة ومحاكاة الدليل الضوئي المستوي ذو الثلاث طبقات (متماثلات وغير متماثلات) و الدليل الضوئي ذو الفتحة.

الهدف كان دراسة تأثير العوامل الهندسية و مؤشر انكسار الطبقة التوجيهية و طول الموجة على خصائص الدليل الضوئي (مؤشر الفعالية و عامل الحصر الضوئي). الطرق المستعملة في المحاكاة هي طريقة المؤشر الفعال و طريقة العناصر المحددة .

كلمات المفاتيح: الدليل الضوئي المستوي, الدليل ذو الفتحة , طريقة المؤشر , طريقة العناصر المحددة .

Résumé :

Dans ce travail nous nous sommes intéressés à l'étude et la simulation d'un guide de lumière plan à trois couches (symétrique et non symétrique) et d'un guide de lumière Slot.

Notre but était d'étudier l'influence des paramètres géométriques, de l'indice de réfraction de la couche guidante et de la longueur d'onde sur les caractéristiques du guide de lumière (l'indice effectif et le facteur de confinement). Les méthodes utilisées dans les simulations sont la méthode de l'indice effectif et la méthode des éléments finis.

Mots clés : guide de lumière plan; guide de lumière Slot ; méthode de l'indice effectif ; méthode des éléments finis.

Abstract :

In this work we were interested about the study and the simulation of a plane optical waveguide with three layers (symmetric and asymmetric) and a Slot optical waveguide.

Our object was to study the influence of geometric parameters, of refractive index of the guide layer and a wavelength on the characteristics of an optical waveguide (the effective index and the confinement factor). The methods used in the simulations are the method of the effective refractive index and the finite element method.

Keywords: optical waveguide; Slot waveguide; effective index method; finite element method.

Listes des acronymes et abréviations

Δ^2 : Laplacien.

\vec{B} : Induction magnétique.

\vec{E} : Champ électrique.

\vec{H} : Champ magnétique.

W_H : Largeur des régions silicium.

W_s : Largeur du Slot.

\vec{j} : Densité de courant.

k_0 : Vecteur d'onde dans le vide.

k_H : Vecteur d'onde des largeurs des régions de silicium.

k_c : Vecteur d'onde de la structure recouverte par du SiO_2 du guide Slot.

n_c : Indice de réfraction supérieur de couverture.

n_H : Indice effectif des régions de silicium.

n_c : Indice de réfraction de la structure recouverte par du SiO_2 du guide Slot.

n_e : Indice effectif dans la direction X.

n_{eff} : Indice effectif.

n_g : Indice de réfraction de la couche guidante.

n_s : Indice de réfraction inférieur du substrat.

ϵ_0 : Permittivité du vide.

μ_0 : Perméabilité du vide.

h : Constante de Planck.

h : Hauteur du guide Slot.

M : Ordre du mode.

M.E.F : Méthode des éléments finis.

M.I.E : Méthode d'indice effectif.

q : Charge électrique

TE : Transverse électrique.

TM : Transverse magnétique.

Γ : Facteur de confinement.

Π : Champ électrique E ou magnétique H.

E : Energie du photon.

c : Vitesse de la lumière

d : Épaisseur de la couche guidante.

f : Fréquence de l'onde

k : Vecteur d'onde.

m : Masse de la particule.

n : Indice de réfraction.

v : Vitesse de la particule.

β : Constante de propagation.

ε : Permittivité électrique du milieu.

λ : Longueur d'onde.

μ : Perméabilité magnétique du milieu.

ρ : Densité de charge.

σ : Conductivité électrique.

ω : La pulsation.

SOI : Silicon o Insulator.

Liste des tableaux

Tableau 1.1 : Equations de MAXWELL, Forme différentielle.....	4
--	---

Dédicace

À mes très chers parents qui ont toujours soutenu, aimé, et qui m'ont donnés un magnifique modèle de labeur et de persévérance, pour tous les sacrifices qu'ils ont consentis pour me permettre de suivre mes études dans les meilleures conditions possibles et n'avoir jamais cessé de m'encourager tout au long de mes années d'étude. J'espère qu'ils trouvent dans ce travail toute ma reconnaissance et tout mon amour

A ma sœur Abla

A mon frère Abderrahmane

A mon fiancer R. Hamza

A mes grands-mères

A mon grand-père

*Et A la mémoire de mon grand-père Mostefaoui Abdelkader
que dieu L'accueil dans son vaste paradis*

À toute ma famille et tous mes amis,

A mon binôme Meriem Garoudja

À tous ceux qui me sont chers.

Mostefaoui Loubna

Listes des figures

Figure1.1 : onde électromagnétique atténuée.....	(10)
Figure. 1.2 : Représentation graphique d'un guide d'onde planaire [8].....	(11)
Figure1.3 : Un guide de lumière Strip.....	(12)
Figure1.4 : Un guide de lumière Bridge.....	(12)
Figure1.5 : Un guide de lumière Rib.....	(13)
Figure1.6 : Un guide de lumière Buried.....	(13)
Figure 1.7 : Représentation graphique d'une fibre optique [11].....	(14)
Figure 1.8 : La couche de silicium cristallin formant de guide d'onde.....	(16)
Figure 1.9 : Principe de la méthode de l'indice effectif.....	(20)
Figure 2.1 : Guide de lumière plan.....	(22)
Figure 2.2 : guide de lumière non symétrique à trois couches.....	(23)
Figure2.3 : Fenêtre de commande de l'environnement MATHCAD.....	(29)
Figure2.4 : Fenêtre de commande de l'environnement COMSOL.....	(30)
Figure 2.5 : Géométrie du guide de lumière plan à trois couches non symétrique.....	(31)
Figure 2.6 : Variation de l'indice effectif en fonction de l'épaisseur de la couche guidante.....	(32)
Figure 2.7 : Variation de l'indice effectif en fonction de l'indice de réfraction de la couche guidante.....	(33)
Figure 2.8 : Variation de l'indice effectif en fonction de la longueur d'onde.....	(33)

Créé avec

Figure 2.9 : Variation du facteur de confinement en fonction de l'épaisseur de la couche guidante.....(34)

Figure 2.10 : Variation du facteur de confinement en fonction de la l'indice de réfraction de la couche guidante.....(35)

Figure 2.11 : Variation du facteur de confinement en fonction de la longueur d'onde.....(35)

Figure 2.12 : Variation de l'indice effectif en fonction de l'épaisseur de la couche guidante.....(36)

Figure 2.13 : Variation de l'indice effectif en fonction de l'indice de réfraction de la couche.....(37)

Figure 2.14 : Variation de l'indice effectif en fonction de la longueur d'onde.....(37)

Figure 2.15: Variation du facteur de confinement en fonction de l'épaisseur de la couche guidante.....(38)

Figure 2.16 : Variation du facteur de confinement en fonction de l'indice de réfraction de la couche guidante.....(39)

Figure 2.17 : Variation du facteur de confinement en fonction de la longueur d'onde.....(39)

Figure 2.18 : Géométrie du guide de lumière à trois couches symétrique.....(40)

Figure 2.19 : Variation de l'indice effectif en fonction de l'épaisseur de la couche guidante.....(41)

Figure 2.20 : Variation de l'indice effectif en fonction de l'indice de réfraction de la couche guidante.....(42)

Figure 2.21 : Variation de l'indice effectif en fonction de la longueur d'onde.....(42)

Figure 2.22 : Variation du facteur de confinement en fonction de l'épaisseur de la couche guidante.....(43)

Figure 2.23 : Variation du facteur de confinement en fonction de l'indice de réfraction de la couche guidante(44)

Figure 2.24 : Variation du facteur de confinement en fonction de la longueur d'onde.....(44)

Figure. 2.25 : Variation de l'indice effectif en fonction de l'épaisseur de la couche guidante.....(46)

Figure 2.26 : Variation de l'indice effectif en fonction de l'indice de réfraction de la couche guidante.....(46)

Figure 2.27 : Variation de l'indice effectif en fonction de la longueur d'onde.....(46)

Figure 2.28 : Variation de facteur de confinement en fonction de l'épaisseur de la couche guidante.....(47)

Figure 2.29 : Variation du facteur de confinement en fonction de l'indice de réfraction de la couche.....(48)

Figure 2.30 : Variation du facteur de confinement en fonction de la longueur d'onde.....(48)

Figure 3.1 : Géométrie du guide Slot.....(51)

Figure.3.2 : Schéma de principe de la méthode de l'indice effectif.....(52)

Figure 3.3 : Profil du champ électrique E_x du mode TE ($W_H = 0,2 \mu m, W_S = 0,3 \mu m$)(54)

Figure 3.4 : Variation de l'indice effectif en fonction de la largeur des régions silicium pour différentes hauteurs ($W_S = 0,2 \mu m$)(55)

Figure.3.5 : Variation de l'indice effectif en fonction de la largeur du slot pour différentes hauteurs ($W_S = 0,2 \mu m$)(55)

Figure.3.6 : Variation du facteur de confinement en fonction de la largeur du Slot pour différents hauteurs ($W_H = 0,2 \mu m$).....(61)

Figure.3.7 variation du facteur de confinement en fonction de la largeur des régions silicium pour différentes hauteurs.....(62)

Tables des matières

Introduction générale.....	01
Chapitre 1 Rappels théoriques	
1.1 Introduction.....	02
1.2 les ondes électromagnétiques	
1.2.1 Théorie électromagnétique de la lumière.....	03
1.2.2 Equations MAXWELL.....	04
1.2.3 Equation d'onde.....	06
1.2.4 Propagation des ondes électromagnétiques.....	07
1.2.5 Propagation dans le vide.....	08
1.3 Différentes polarisation d'une onde électromagnétique.....	10
1.4 Définition d'un guide de lumière.....	10
1.5 Les types des guides de lumière.....	11
1.5.1 Guide de lumière planaire.....	11
1.5.2. Guide d'onde bidimensionnelle.....	11
- Guide de lumière Strip.....	12
- Guide de lumière Ridge.....	12
- Guide de lumière Rib.....	13
- Guide de lumière Buried.....	13
1.5.3 Fibre optique.....	13
1.6 Matériaux pour l'optique guidée.....	14
a. Diélectrique.....	15
b. Semi-conducteurs(SOI).....	15
1.7 Fonctions des dispositifs à base de guide d'onde.....	16
a. Interconnexions optiques.....	17
b. Diviseur de puissance.....	17
1.8 Les caractéristiques d'un guide de lumière.....	17
1.8.1 Le facteur de confinement.....	17
1.8.2 L'indice effectif.....	18
1.8.3 Les pertes optiques.....	18
a. Pertes intrinsèques.....	18

b. Pertes extrinsèques.....	18
1.9 Les outils de simulation.....	19
1.9.1 La méthode des éléments finis.....	19
1.9.2 Méthode de l'indice effectif.....	20
1.10 Conclusion.....	21
Chapitre2 Guide de lumière plan à trois couches	
2.1 Introduction.....	22
2.2 Propagation dans un guide de lumière plan.....	22
2.3 Guide de lumière plan non symétrique à trois couches.....	23
2.3.1 Le mode TE.....	23
a. Equation d'onde.....	24
b. Conditions aux limites.....	25
c. Equation aux valeurs propres.....	25
2.3.2 Le mode TM.....	26
a. Equation d'onde.....	26
b. Conditions aux limites.....	27
c. Equations aux valeurs propres.....	28
2.4 Présentations des outils de simulation.....	29
2.4.1 Mathcad (version15).....	29
2.4.2 Comsol Multiphysics (version4.0a).....	30
2.5 Résultats et discussion.....	31
2.5.1 Etude d'un guide de lumière plan non symétrique à trois couches.....	31
a. Le mode TE.....	32
1. L'indice effectif en fonction des paramètres géométriques de la structure.....	32
2. Le facteur de confinement en fonction des paramètres géométriques de la structure.....	34
b. Le mode TM.....	36
1. L'indice effectif en fonction des paramètres géométriques de la structure.....	36
2. Le facteur de confinement en fonction des paramètres géométriques de la structure.....	38
2.5.2 Interprétations des résultats.....	40

2.5.3 Etude d'un guide de lumière plan symétrique à trois couches.....	40
a. Le mode TE.....	41
1. L'indice effectif en fonction des paramètres géométriques de la structure.....	41
2. Le facteur de confinement en fonction des paramètres géométriques de la structure.....	43
b. Le mode TM.....	45
1. L'indice effectif en fonction des paramètres géométriques de la structure.....	45
2. Le facteur de confinement en fonction des paramètres géométriques de la structure.....	47
2.5.4 Interprétations des résultats	49
2.6 Conclusion.....	49
Chapitre 3 Etude d'un guide de lumière Slot	
3.1 Introduction.....	50
3.2 Géométrie du guide Slot.....	51
3.3 Théorie du model.....	52
3.4 Résultats et discussion de simulation.....	54
3.4.1 Etude d'un guide de lumière Slot.....	54
a. L'indice effectif.....	55
b. Le facteur de confinement.....	56
3.5 Conclusion.....	57
Conclusion générale.....	58
Bibliographie.....	60

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 : c'est le monde des guides optiques.

Le développement des composants optoélectroniques nécessite que soit maîtrisé le problème du guidage de la lumière. Notre travail s'inscrit dans ce contexte et consiste à simuler un guide de lumière plan puis un guide de lumière slot, en utilisant deux méthodes numériques pour la résolution de l'équation d'onde, et déterminer les caractéristiques du guide. La réalisation de tels calculs nécessite la mise en œuvre d'outils logiciels performants. L'étude décrite dans ce mémoire porte donc sur le développement d'un moyen de calcul informatique pour simuler des guides de lumière.

L'étude présentée dans ce mémoire est organisée en trois chapitres :

- Le premier chapitre est un bref rappel théorique, nous y présenterons la théorie des ondes électromagnétiques, puis le phénomène de la propagation dans un guide de lumière plan. Enfin des généralités sur les guides de lumière.
- Le deuxième chapitre présente une étude unidimensionnelle d'un guide de lumière plan à trois couches (symétrique et non symétrique) avec deux méthodes numériques : la méthode d'indice effectif et la méthode des éléments finis.
- Dans le troisième chapitre, nous présenterons l'influence des paramètres géométriques sur les caractéristiques des guides Slot en utilisant la méthode de l'indice effectif et la méthode des éléments finis.

Enfin, nous terminons par une conclusion.

1.1 Introduction :

L'homme a toujours voulu prolonger ses activités au delà de coucher du soleil, le feu fut sa première lumière artificielle mais il était difficile à transporter et pour cela l'étude de la lumière a suscité l'intérêt des savants et elle les amenés à se poser de nombreuses questions sur la nature de ce phénomène depuis l'antiquité.

Les résultats obtenus ont conduit les physiciens de l'époque à émettre deux théories apparemment contradictoires sur la nature de la lumière. Newton avait développé une théorie purement corpusculaire de la lumière et Christian Huygens propose une théorie ondulatoire de la lumière.

Nous allons présenter dans ce chapitre, dans un premier temps, des généralités sur la théorie électromagnétique avec une description détaillée des équations de MAXWELL, ensuite une définition d'un guide de lumière et les diverses structures utilisées dans l'optique intégrée seront exposées, telles que : le guide de lumière plan et le guide de lumière Slot...

1.2 Les ondes électromagnétiques :

1.2.1 Théorie électromagnétique de la lumière :

Vers le milieu du dix-neuvième siècle, le physicien anglais JAMES CLERK MAXWELL a réussi à exprimer les lois de l'électromagnétisme 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 [1].

La découverte de l'effet Photoélectrique, qui résulte de l'action d'une onde électromagnétique sur un métal, qui traduit l'interaction d'une onde et d'une particule, a permis d'élaborer une théorie qui tient compte des aspects ondulatoires de la lumière.

Pour expliquer ce phénomène EINSTEIN (en 1905) admet que l'énergie véhiculée par l'onde électromagnétique, au lieu d'être uniformément répartie sur la surface d'onde comme en mécanique, est concentrée sous forme de grains d'énergie ou <<photon>> [2].

La fréquence f [HZ] de l'onde et l'énergie W du photon sont reliées par la formule :

$$E = h \cdot f \quad (1.1)$$

Où : $h=6.62.10^{-34} J.S$ est la constante de Planck

Inversement, on peut associer a toute particule (électron, neutron...) de masse m , animée d'une vitesse v suffisamment grande, une onde caractérisée par :

$$\lambda = \frac{h}{m \cdot v} \quad (1.2)$$

Avec :

λ : Longueur d'onde (μm)

Cette théorie, introduite par DE BROGLIE en 1923, a été vérifiée expérimentalement par DAVIDSON et GERMER EN 1927 [3].

1.2.2 Equations de MAXWELL :

Nous savons qu'il existe un nombre important d'interactions entre les particules fondamentales qui composent la matière, parmi elles, l'interaction électromagnétique qui est associée à une propriété caractéristique de chaque particule, appelée sa charge électrique.

Pour décrire l'interaction électromagnétique, on a introduit la notion de champ électromagnétique, caractérisé par deux vecteurs : le champ électrique \vec{E} et le champ magnétique \vec{H} , telle que la force agissant sur une charge électrique soit donnée par :

(Force de LORENTZ) [4].

$$\vec{F} = q.(\vec{E} + \vec{v} \wedge \vec{B}) \quad (1.3)$$

Avec : $\vec{B} = \mu. \vec{H}$

v : vitesse de la particule.

q : charge électrique.

Les champs \vec{E} et \vec{H} sont également liés l'un à l'autre par les lois d'Ampère-MAXWELL et FARADAY-HENRI, ces relations s'expriment en quatre lois, que nous citerons ci-dessous, et qui peuvent s'écrire sous leurs formes différentielles, comme le représente le tableau suivant :

loi	Forme Différentielle
Théorie de GAUSS pour le champ électrique	$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon}$
Théorie de GAUSS pour le champ magnétique	$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$
Loi de FARADAY-HENRI	$\vec{\nabla} \wedge \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$
Loi d'AMPERE-MAXWELL	$\vec{\nabla} \wedge \vec{H} = \vec{j} + \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$

Tableau 1.1 : Equations de MAXWELL, Forme différentielle.

Avec :

\vec{E} : Champ électrique.

\vec{B} : Induction magnétique.

\vec{H} : Champ magnétique.

ρ : Densité de charge.

ε : Permittivité du milieu.

\vec{J} : Densité de courant.

La théorie du champ électromagnétique est condensée dans quatre lois appelées Equations de MAXWELL, car c'est Maxwell qui en plus d'avoir formulé la quatrième loi, a reconnu que leur ensemble formait la base de la théorie des interactions électromagnétique [1].

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

$$\begin{aligned} \vec{\nabla} \cdot \vec{E} &= 0 & , & & \vec{\nabla} \cdot \vec{H} &= 0 \\ \vec{\nabla} \wedge \vec{E} &= - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} & & & \vec{\nabla} \wedge \vec{H} &= \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \end{aligned} \quad (1.4)$$

Où : $\varepsilon_0 = \frac{10^9}{36} \cdot \pi$ Farad/mètre et $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ Henry/mètre

La synthèse des interactions qu'expriment les équations de Maxwell représente l'une des plus grandes réalisations de la physique et c'est ce qui place ces interactions dans une position privilégiée. Ce sont les mieux comprises de toutes les interactions et les seules qui puissent être exprimées sous une forme mathématique compacte et cohérente. Ceci a constitué une chance pour l'humanité dans la mesure où une grande part de notre civilisation moderne a été rendue possible par la compréhension des interactions électromagnétiques, car elles sont responsables de la plupart des processus naturels ou créés par l'homme qui affectent notre vie quotidienne.

1.2.3 Equation d'ondes :

Les équations de MAXWELL appliquées à un milieu connu et avec conditions initiales et aux limites données, permettent d'une manière rigoureuse de décrire les champs électromagnétiques sous certaines conditions .Celles-ci ont été vérifiées expérimentalement pour la première fois par R.H ; HERTZ en 1888, à l'aide d'un dispositif électrique « ondes hertzienne » [3].

Ces équations sont utilisées pour l'étude de la propagation dans des structures d'intérêt telles que les « guides d'ondes » [5].

Sachant que les équations de MAXWELL dans un milieu matériel homogène, de permittivité électrique ϵ , de perméabilité magnétique μ , de conductivité électrique σ , contenant des charges de densité volumique ρ , s'écrivent :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon} \quad (1.5)$$

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

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{E} = -\mu \cdot \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \quad (1.7)$$

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{H} = \vec{J} + \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (1.8)$$

On a :

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{\nabla} \wedge \vec{E} = \vec{\nabla} \wedge \left(-\mu \cdot \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \right) = -\mu \frac{\partial (\vec{\nabla} \wedge \vec{H})}{\partial t} = -\epsilon \cdot \mu \cdot \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} - \mu \cdot \frac{\partial \vec{J}}{\partial t} \quad (1.9)$$

Or :

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{\nabla} \wedge \vec{E} = \vec{\nabla} \cdot (\vec{\nabla} \cdot \vec{E}) - (\vec{\nabla} \cdot \vec{\nabla}) \cdot \vec{E} \text{ (propriétés des fonctions vectorielles)}$$

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{\nabla} \wedge \vec{E} = \vec{\nabla} \left(\frac{\rho}{\epsilon} \right) - \vec{\nabla}^2 \cdot \vec{E} \quad (1.10)$$

$$(1.9) \text{ et } (1.10) \Rightarrow \epsilon \cdot \mu \cdot \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} + \mu \cdot \frac{\partial \vec{J}}{\partial t} = \vec{\nabla}^2 \cdot \vec{E} - \frac{1}{\epsilon} \vec{\nabla}(\rho)$$

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

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

$$\varepsilon \cdot \mu \cdot \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} + \mu \cdot \frac{\partial \vec{J}}{\partial t} = \Delta \vec{E} - \frac{1}{\varepsilon} \cdot \vec{\nabla} \cdot \rho \quad (1.11)$$

Dans le cas d'un milieu diélectrique homogène, en absence de charges et de courants

($\vec{J} = 0, \rho = 0$) l'équation (1.11) se réduit à :

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

De la même manière, on trouve l'équation d'onde pour un champ magnétique.

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

Ces deux équations admettent comme solutions générales :

$$\vec{E} = \vec{E}_0 \cdot [A \cdot \exp(j(\omega t - \beta z)) + B \cdot \exp(-j(\omega t - \beta z))] \quad (1.12)$$

$$\vec{H} = \vec{H}_0 \cdot [C \cdot \exp(j(\omega t - \beta z)) + D \cdot \exp(-j(\omega t - \beta z))] \quad (1.13)$$

1.2.4 Propagations des ondes électromagnétiques:

Vers la fin du XIXème siècle, le physicien allemand HEINRECH HERTZ (1857-1894) a prouvé de manière indiscutable que le champ électromagnétique se propage bien dans le vide avec une vitesse égale a :

$$c = \frac{1}{\varepsilon_0 \cdot \mu_0} = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s} \quad (1.14)$$

La grande accumulation d'informations qui ont été recueillies sur les propriétés des ondes électromagnétiques, en particulier leur production, leur propagation, et leur absorption, a ouvert la porte au monde des télécommunications.

En utilisant les équations de MAXWELL, nous allons voir comment nous pouvons interpréter la propagation du champ sous la forme d'onde.

Dans ce cas, il nous faut trouver si les champs électrique et magnétique satisfont une équation d'onde de forme :

$$\frac{d^2\Pi}{dZ} = \frac{1}{v^2} \cdot \frac{d^2\Pi}{dt^2} \quad (1.15)$$

Avec : Π représente le champ électrique E ou magnétique H.

Cette équation est appelée équation différentielle du mouvement ondulatoire, et décrit un mouvement ondulatoire se propageant à une vitesse bien déterminée v et sans déformation suivant les sens (+z) ou (-z).

1.2.5 Propagation dans le vide :

Nous supposons que le champ électromagnétique se trouve dans le vide, c'est-à-dire qu'il n'existe aucune charge libre et aucun courant, ce qui implique que ($\rho = 0$) et ($J = 0$) dans les équations de MAXWELL. Alors cherchons à déterminer si les équations de MAXWELL du champ électromagnétique admettent comme solution particulière un champ électrique E et un champ magnétique H perpendiculaire l'un à l'autre.

Nous prenons l'axe des y parallèle au champ E, et la direction de propagation suivant l'axe des z :

$$\left. \begin{array}{l} E_x = 0 \\ E_y \neq 0 \\ E_z = 0 \end{array} \right\} \Rightarrow E = E_y \quad \left. \begin{array}{l} H_x \neq 0 \\ H_y = 0 \\ H_z = 0 \end{array} \right\} \Rightarrow H = H_x \quad (1.16)$$

Pour obtenir la dépendance de \vec{E} et \vec{H} en fonction de z et t, nous appliquons l'ensemble des équations (1.16) sur les équations (1.4) de MAXWELL, nous déduisons les relations suivantes :

$$\frac{d^2 \vec{E}}{dt^2} - \left(\frac{1}{\epsilon_0 \mu_0} \right) \cdot \frac{d^2 \vec{E}}{dz^2} = 0 \quad (1.17)$$

$$\frac{d^2 \vec{H}}{dt^2} - \left(\frac{1}{\epsilon_0 \mu_0} \right) \cdot \frac{d^2 \vec{H}}{dz^2} = 0 \quad (1.18)$$

Ces équations indiquent que les champs \vec{E} et \vec{H} se propagent suivant l'axe des z avec la vitesse :

$$c = \frac{1}{(\epsilon_0 \cdot \mu_0)^{1/2}} \quad (1.19)$$

Si on considère en particulier le cas d'onde sinusoïdales de fréquence $f = \frac{\omega}{2\pi}$ et de longueur d'onde $\lambda = \frac{2\pi}{k_0}$

$$\vec{E} = \vec{E}_0 \cdot \sin[k_0 \cdot (ct - z)] = \vec{E}_0 \cdot \sin[\omega \cdot t - k_0 \cdot z] \quad (1.20)$$

$$\vec{H} = \vec{H}_0 \cdot \sin[k_0 \cdot (ct - z)] = \vec{H}_0 \cdot \sin[\omega \cdot t - k_0 \cdot z] \quad (1.21)$$

A partir de ces deux équations nous pouvons alors décrire l'onde électromagnétique comme dans la figure (1.1) :

- Le champ électrique oscille dans le plan (X, Z) et le champ magnétique dans le plan (Y, Z), cela correspond à une onde polarisée linéairement, c'est-à-dire dans un plan.
- Le plan de polarisation est défini comme étant le plan dans lequel oscille le champ électrique, dans ce cas le plan (X, Z).
- L'onde électromagnétique consiste réellement en deux ondes couplées : électrique et magnétique.

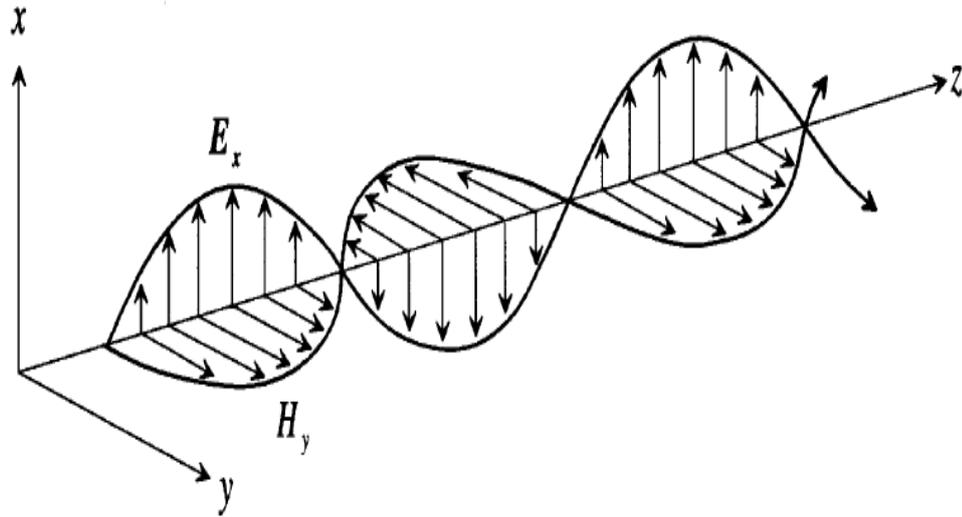


Figure1.1 : Propagation d'une onde électromagnétique [6].

1.3 Différentes polarisations d'une onde électromagnétique :

Il existe deux polarisations pour une onde se propageant dans la direction Z :

- La polarisation TE (composante du champ E_z nulle), la seule composante du champ électrique non nulle se situe dans le plan transverse (E_y).
- La polarisation TM si la composante du champ axial H_z est nulle, puisque le champ magnétique a seulement une composante transverse.

1.4 Définition d'un guide de lumière :

Un guide de lumière est une structure physique qui guide les ondes électromagnétiques dans le spectre optique. Les guides de lumière sont utilisés comme composants dans des circuits optiques intégrés ou comme support de transmission dans des systèmes de communications optiques. Ils peuvent être classés en fonction de leur géométrie (guides d'ondes planaires, bande ou fibre), la structure de mode (monomode, multimode), la distribution d'indice de réfraction (saut ou gradient d'indice) et le matériau (verre, polymère, semi-conducteurs) [7].

1.5 Les Types d'un guide de lumière :

1.5.1 Guide de lumière planaire :

Le guide de lumière plan est un empilement de trois couches de matériaux d'indices de réfraction différents figure (1.2). La lumière se propage préférentiellement dans la couche d'indice de réfraction n_g (couche guidante) si celle-ci est entourée de deux couches : une couche inférieure de substrat d'indice de réfraction n_s et une couche supérieure de couverture d'indice de réfraction n_c (généralement l'air $n_0 = 1$). 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 [8].

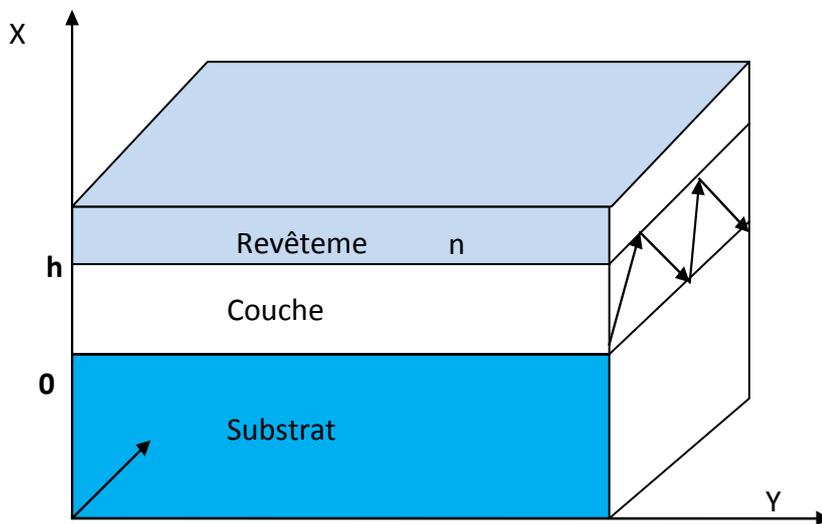


Figure. 1.2 : Représentation graphique d'un guide d'onde planaire [8].

Pour que l'énergie lumineuse puisse être confinée dans le guide d'indice n_g deux conditions doivent être respectées :

- Les indices de réfraction des trois milieux constituant le guide plan doivent vérifier la condition $n_g > n_s \geq n_c$
- L'épaisseur du guide ne doit pas être inférieure à une limite critique en dessous de laquelle il n'y a plus de guidage [9].

1.5.2 Guide de lumière bidimensionnel :

Un guide de lumière plan présente généralement peu d'intérêt en optique intégrée car la lumière diverge transversalement lors de sa propagation. Il restreint le

mode latéralement d'où la réalisation des guides à deux dimensions.

Avec la technologie actuelle, il est aisé de réaliser un confinement latéral en utilisant un guide bidimensionnel. On appelle un guide bidimensionnel un guide d'onde de section constante invariante en z et dont la permittivité varie dans la section. Les modes TE et TM n'existent pas au sens strict pour un guide d'onde bidimensionnel. Néanmoins il y a toujours deux familles des solutions qu'on désigne par les termes quasi-TE et quasi-TM. Les premières ont la composante majoritaire du champ électrique parallèle au substrat, et les secondes ont la composante majoritaire du champ magnétique parallèle au substrat.

On a aussi d'autres types :

- Guide de lumière Strip :

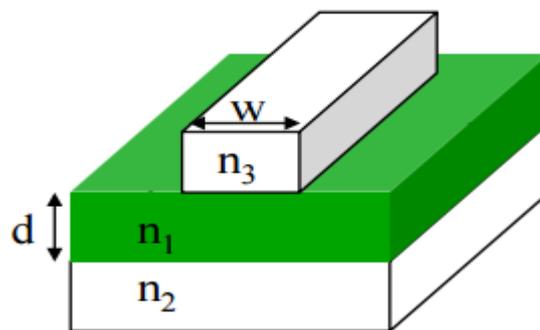


Figure1.3 : Un guide de lumière Strip [10].

- Guide de lumière Ridge :

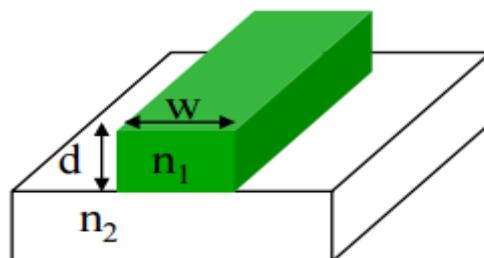


Figure1.4 : Un guide de lumière Bridge [10].

- **Guide de lumière Rib:**

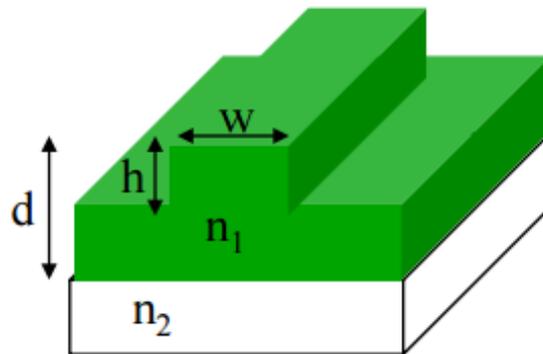


Figure1.5: Un guide de lumière Rib.

- **Guide de lumière Buried :**

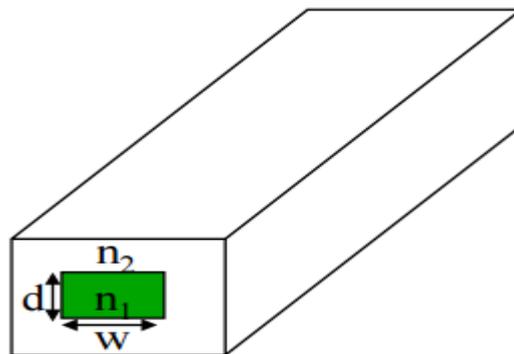


Figure1.6 : Un guide de lumière Buried [10].

1.5.3 Fibre optique :

Une fibre optique est un guide d'onde optique à symétrie circulaire telle que schématisée sur la figure (1.7). Ce guide est constitué de deux ou plusieurs couches de matériaux diélectriques transparents (verre de silice ou plastique) d'indices de réfraction différents assurant le confinement de la lumière au voisinage du centre. Elle présente des meilleures qualités de transmissions et elle permet de faire passer un très grand nombre d'informations (large bande passante). On peut avoir plusieurs canaux de transmission simultanément sur une fibre [11].

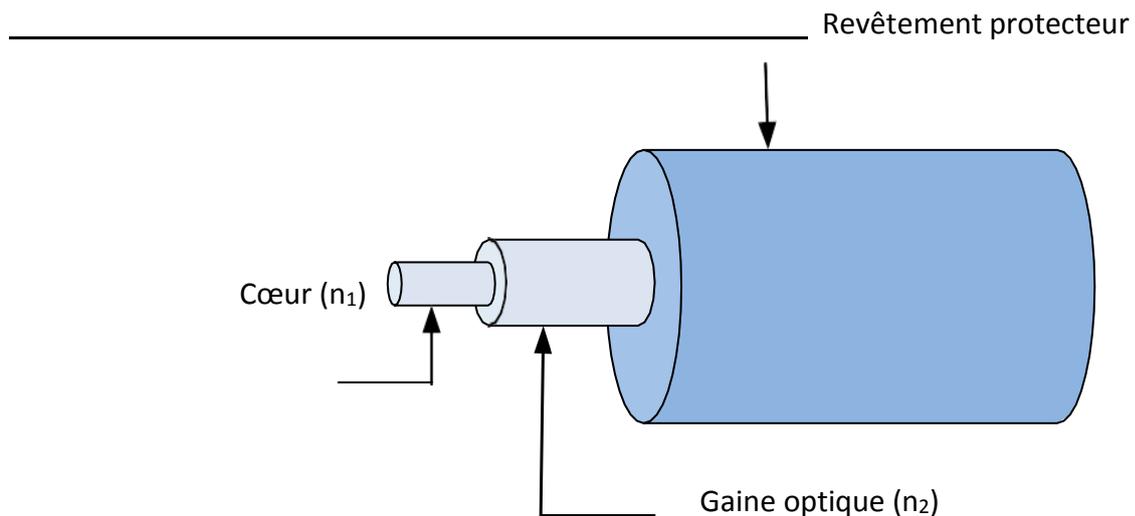


Figure 1.7 : Représentation graphique d'une fibre optique [11].

1.6 Matériaux pour l'optique guidée :

Divers types de matériaux peuvent être utilisés pour guider la lumière. Parmi les critères de sélection, on trouve :

- L'atténuation de la lumière guidée se propageant dans un matériau donné : Elle doit être la plus faible possible.
- Le degré de confinement exprimé par la différence Δn entre l'indice de réfraction de la couche guidante et les indices des couches de confinement : Chacun de ces guides, à faible ou à fort Δn , possède des avantages et des inconvénients en terme de pertes de propagation ou de pertes par couplage à travers les couches de confinement. Les guides monomodes à faible valeur de Δn sont bien adaptés pour le couplage guide-fibre optique. Les guides à fort Δn permettent quant à eux la réalisation de guides courbés à faible rayon de courbure, ce type de guide peut être utilisé pour établir des connexions optiques dans les circuits intégrés à haute densité d'intégration [12].

On présente rapidement dans ce paragraphe les principaux matériaux de base pour l'optique intégrée, à savoir les diélectriques et les semi-conducteurs.

a. Diélectriques :

Les diélectriques (SiO_2 , Si_3N_4 , SiO_xN_y) déposés sur silicium permettent de réaliser des guides optiques à faibles pertes de propagation. Selon la nature de la couche guidante, on peut avoir une faible différence d'indice et ainsi conserver des guides épais tout en conservant le caractère monomode. Par contre, on peut par exemple déposer une couche de nitrure de silicium ($n_g=2$) sur la silice ($n_s=1.5$) et assurer un fort Δn .

Cependant, les diélectriques ont le désavantage de ne conduire qu'à la réalisation de composants passifs. Il est vrai qu'une perturbation des indices de réfraction d'origine thermique peut les rendre actifs mais en pratique les temps de réponse restent longs (de l'ordre de la ms).

b. Semi-conducteurs (SOI) :

Dans la famille des semi-conducteurs, le silicium, qui est l'élément incontournable de la microélectronique, prend une importance croissante en optoélectronique dans la mesure où on essaye de profiter de son faible coût et de sa maîtrise technologique en microélectronique, en même temps que de ses propriétés physique et électronique [12,13].

Une solution envisageable pour l'optique intégrée qui constitue la base des composants étudiés dans ce mémoire, est le silicium sur isolant, communément appelé SOI (**Silicon-On-Insulator**). Le substrat SOI est constitué d'un substrat de silicium, d'une couche de silice enterrée sous une couche de silicium cristallin formant un guide d'onde naturel aux longueurs d'onde des télécommunications optiques figure 1.8 :

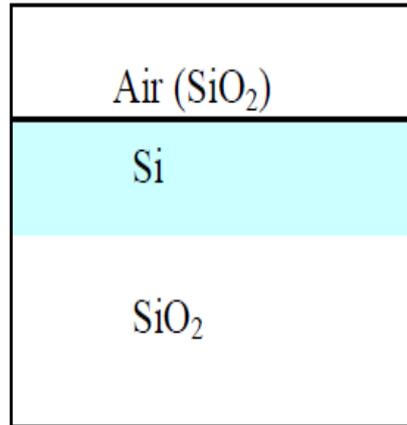


Figure 1.8 : Guide d'onde de la technologie (SOI).

Le film de silicium d'indice $n = 3.47564$ à la longueur d'onde $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$, est situé entre la couche de silice enterrée d'indice $n_{\text{SiO}_2} = 1.44404$ à la même longueur d'onde et l'air d'indice $n_{\text{air}} = 1$ ou une couche de silice de passivation (n_{SiO_2}). Le film de silicium apparaît donc comme la couche active de la structure.

La grande différence d'indice entre la silice de passivation (ou l'air) et le silicium assure un très fort confinement du champ électromagnétique dans la zone de haut indice, ce qui permet de diminuer les dimensions latérales du guide jusqu'à des dimensions submicroniques, en utilisant les technologies classiques développées en microélectronique.

On peut aussi concevoir de la même façon des virages de faible rayon de courbure, c'est à dire de quelques microns.

La technologie SOI a ouvert la voie à la réalisation de circuits optiques intégrés sur silicium de meilleure qualité optique et de faible coût de fabrication [14].

1.7 Fonctions des dispositifs à base de guide d'onde :

Comme déjà mentionné préalablement, tous les types des guides d'ondes réalisent la même tâche laquelle confiner et guider la lumière au sein d'un processus de block ou dispositif. A part la fonction principale de confiner et guider la lumière, ils existent plusieurs d'autres tâches ou fonctions de base que peuvent être réalisées par les guides d'onde comme :

a. Interconnexion optiques :

Comme l'indique leur nom, ils servent à connecter optiquement deux points éléments sur une puce optique. S'il existe un décalage nécessaire entre les deux points c'est-à-dire les deux éléments ne sont pas alignés les uns aux autres, donc, des guides d'ondes de forme S-Bend seraient utilisés.

b. Diviseurs de puissance :

Ces dispositifs utilisés pour diviser la puissance à partir d'un guide d'onde à seul canal entre deux en sortie du guide. La forme la plus simple de ces élément est communément appelé **Y-Diviseur (Y-branche)** à cause de leur forme **Y** distincte. Une extension de ce dispositif aurait plus que deux branches de sortie et comme le terme **1xN diviseur** qui était adopté pour générer N nombre de branches en sortie du guide d'onde. Ils existent d'autre dispositifs similaire qui effectuent la même fonction tels que: les coupleurs de forme **X**.

1.8 Les caractéristiques d'un guide de lumière :

1.8.1 Le facteur de confinement :

Pour différentes caractéristiques des matériaux 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 active.
- En tendant vers les extrémités du guide, les champs doivent être nuls, pour éviter 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 doit être élevé pour que le guide soit performant.

On définit le facteur de confinement par le rapport de la puissance du guide sur la puissance totale.

$$\Gamma = \frac{P_{guide}}{P_{Totale}} \quad (1.22)$$

1.8.2 L'indice effectif :

L'indice effectif est le rapport de la constante de propagation dans le guide d'ondes à la constante de propagation en espace libre.

$$n_{eff} = \frac{\beta}{k_0} \quad (1.23)$$

1.8.3 Les pertes optiques

Le troisième paramètre important à considérer concerne les pertes optiques engendrées par le guide pour le mode qui se propage. Les pertes de la lumière se propageant dans un guide (par unité de longueur) peuvent avoir deux origines, les pertes dues à l'absorption des matériaux, appelées pertes intrinsèques et les pertes dues aux imperfections du guide, appelées pertes extrinsèque [15].

a. Pertes intrinsèques :

Les pertes intrinsèques sont dues à l'absorption optique dans les matériaux qui constituent le guide. L'absorption provient de différents phénomènes physiques : absorption par porteurs libres, absorption inter bande, absorption à deux photons... Dans Le domaine du moyen infrarouge, l'absorption par porteurs libres est l'absorption dominante [15].

b. Pertes extrinsèques :

La lumière est diffusée par les impuretés du guide dont les dimensions sont supérieures à λ/n où λ est la longueur d'onde de l'onde qui se propage dans le guide et n l'indice effectif du mode. Les pertes optiques engendrées sont les pertes extrinsèques. Une fabrication optimisée permet de limiter ces pertes [15].

1.9 Les outils de simulation

Ce paragraphe expose les deux principales méthodes de simulation utilisées dans notre travail qui vont permettre de déterminer la valeur de l'indice effectif et le facteur de confinement : une méthode semi-numérique c'est la méthode de l'indice effectif et une méthode numérique c'est la méthode des éléments finis.

a. La méthode des éléments finis :

La méthode des éléments finis est une méthode numérique qui permet de résoudre des équations aux dérivées partielles. Elle n'est pas limitée à la recherche de modes guidés car n'importe quel système dont les équations qui le régissent sont connues peut être traité. La géométrie du système se décompose en domaines. Pour chaque domaine les caractéristiques physiques doivent être identiques. Une fois que la géométrie du système est définie, chaque domaine est discrétisé spatialement selon un maillage fin ou grossier et qui peut dépendre du domaine. Pour chaque maille, le programme (dans notre projet, on va utiliser le logiciel commercial COMSOL) définit des points pour lesquels la (les) variable(s) pertinentes(s) va (vont) être calculée(s). En règle générale, les points choisis correspondent aux nœuds du maillage, ce qui impose une relation de continuité entre les différentes mailles. L'ensemble maille+points s'appelle l'élément. En fonction des équations à résoudre, le programme (ou l'utilisateur) va choisir les fonctions d'interpolation sur lesquelles la solution va être projetée. Pour chaque élément il est nécessaire de trouver les paramètres de la fonction d'interpolation qui permet d'avoir les valeurs de la solution aux points de la maille. Une fois que le système d'équations qui relie les valeurs de la variable aux points de la maille aux paramètres de la fonction d'interpolation est déterminé, le programme construit un système d'équations algébriques pour le résoudre. Cette étape s'appelle la formulation variationnelle du problème. Un des paramètres à optimiser est le temps de calcul. La première solution est d'utiliser des symétries du système. La deuxième solution consiste à optimiser le maillage. Ce dernier doit être adapté au mode recherché. A titre d'exemple, le maillage doit être fin dans les régions où les variations du champ sont rapides dans le domaine spatial. Inversement, si les variations du champ sont lentes dans le domaine spatial, le maillage peut être grossier. La méthode des éléments finis est notre méthode de prédilection dès que la géométrie du guide exige une résolution à deux dimensions [15].

b. Méthode de l'indice effectif :

Une des méthodes les plus utilisées pour analyser les guides à deux dimensions est la méthode dite de « l'indice effectif ». Elle a été introduite en 1970 par Knox et Toullos pour décrire le comportement d'un guide rectangulaire. Le très bon accord entre les résultats calculés par cette méthode et les solutions obtenues par l'analyse numérique en a prouvé tout l'intérêt.

La méthode de l'indice effectif consiste à diviser le problème du guide rectangulaire à deux dimensions en deux problèmes à une dimension plus simple à résoudre.

Cette méthode est applicable à condition que la dimension du guide dans une direction soit très grande que dans l'autre direction, ce qui est vérifié dans notre cas, puisque l'épaisseur de la couche guidante est très faible par rapport à la largeur du ruban.

La méthode consiste en deux étapes (figure 1.9)

1ère étape : direction ox

Chaque zone est considérée comme un guide plan à N couches, pour lequel on calcule l'indice effectif.

2ème étapes : direction oy

On considère le guide plan dans la direction oy et on calcule son indice effectif qui sera l'indice effectif de la structure.

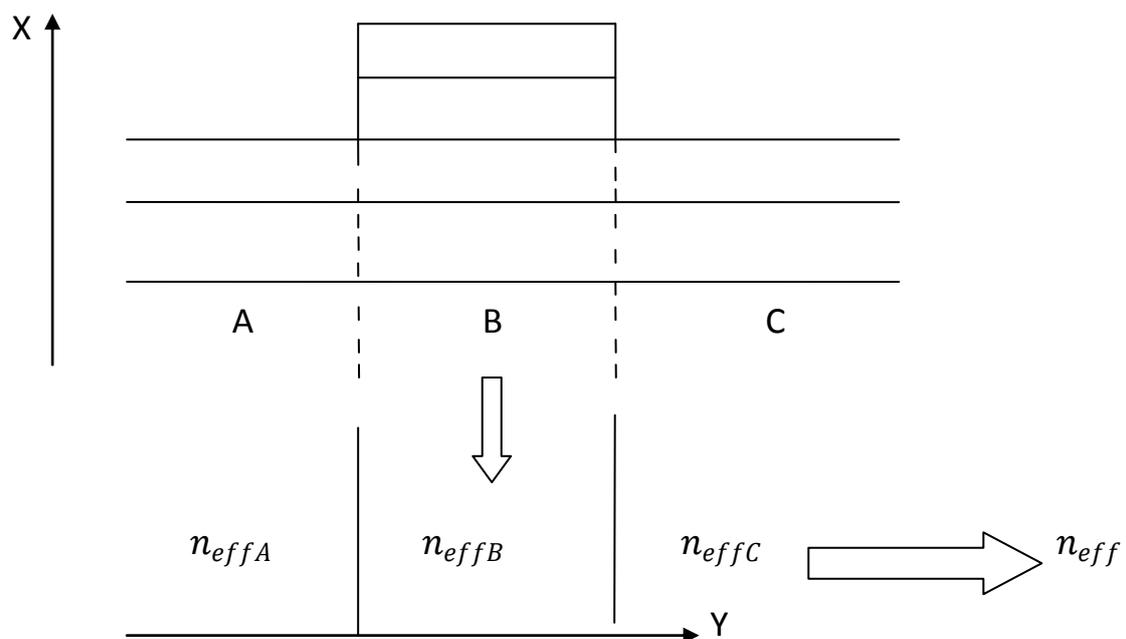


Figure 1.9 : Principe de la méthode de l'indice effectif.

1.10 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différentes lois qui gouvernent la lumière dans les milieux confinés. Les diverses structures des guides de lumière ainsi que leurs paramètres ont été exposés. Enfin, les principes des méthodes utilisées dans la simulation ont été présentés.

2.1 Introduction :

Dans ce chapitre nous présenterons une étude d'un guide de lumière à trois couches. Cette étude sera faite par deux méthodes différents, ce qui nous permettra de valider nos résultats : la méthode de l'indice effectif en utilisant l'outil de simulation MATHCAD et la méthode des éléments finis par l'utilisation de l'outil COMSOL.

2.2 Propagation dans un guide de lumière plan :

Un guide de lumière plan est constitué de plusieurs couches superposées avec des indices de réfraction et des épaisseurs différents (figure 2.1)

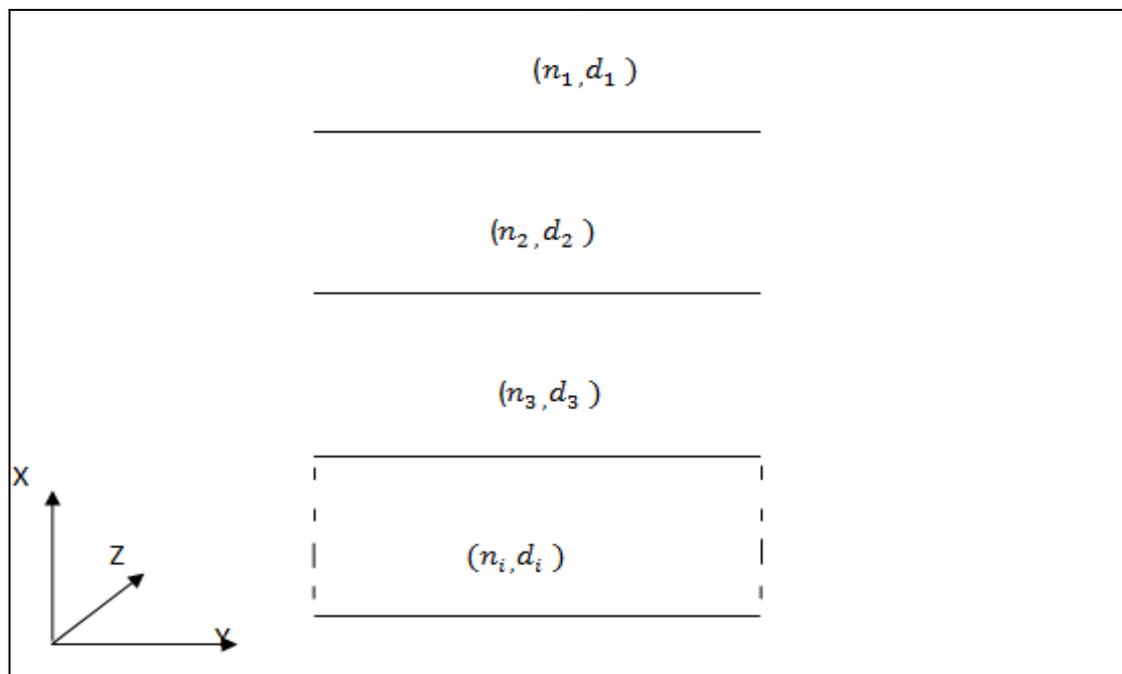


Figure 2.1 : Guide de lumière plan.

Pour qu'il y'ait guidage de la lumière, il faut que l'indice de réfraction de la couche centrale (guidante) soit supérieure à celui des couches latérales, ou le champ est évanescent [16].

Le guide étant considéré infini suivant y , la variation du champ suivant cette direction peut être négligée.

2.3 Guide de lumière plan non Symétrique à trois couches :

Nous considérons un guide de lumière, dont la forme est la plus simple, il s'agit d'un guide à trois couches où les couches latérales sont considérées d'épaisseurs infinies comme il est représenté dans la figure (2.2)

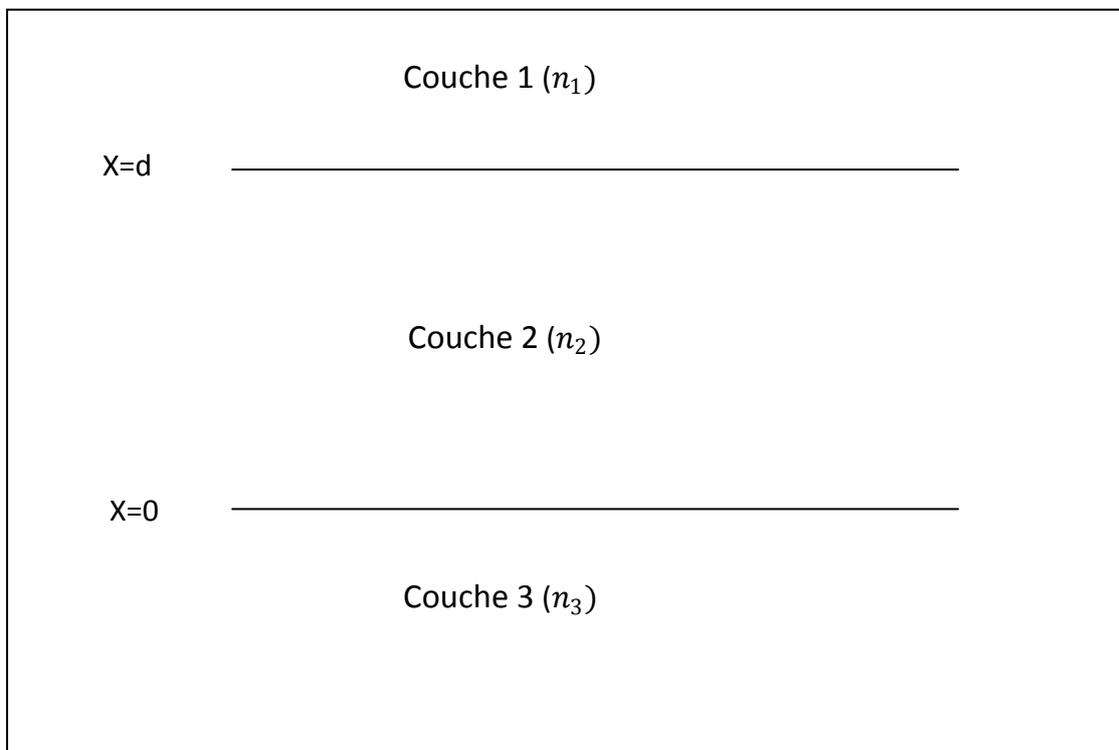


Figure 2.2 : guide de lumière non symétrique à trois couches.

2.3.1 Le mode TE :

On étudie ce guide pour les modes TE qui sont décrits par l'expression du champ électrique E_y , se propageant dans la direction de l'axe des Z, par l'équation :

$$E_y(x, z, t) = E_y(x) \cdot \exp[ij(\omega \cdot t - \beta \cdot z)] \quad (2.1)$$

ω : La pulsation.

β : La constante de propagation.

a. Equation d'onde :

Les composantes du champ électromagnétique obéissent aux expressions suivantes déduites des équations de Maxwell :

$$\begin{cases} E_x = 0 \\ \frac{d^2 E_y}{dx^2} + (n^2 \cdot k_0^2 - \beta^2) \cdot E_y = 0 \\ E_z = 0 \end{cases} \quad (2.3)$$

$$\begin{cases} H_x = \left(\frac{\beta}{\omega \cdot \mu_0}\right) \cdot E_y \\ H_y = 0 \\ H_z = -\left(\frac{1}{j \cdot \omega \cdot \mu_0}\right) \cdot \frac{dE_y}{dx} \end{cases} \quad (2.3^*)$$

La solution générale de la deuxième équation de l'ensemble (2-3) est de la forme :

$$E_y(x) = A \cdot \exp(\alpha \cdot x) + B \cdot \exp(-\alpha \cdot x) \quad (2.4)$$

Avec : $\alpha = (\beta^2 - n^2 \cdot k_0^2)^{1/2}$

La méthode de détermination du champ électromagnétique dans le guide consiste à résoudre l'équation (2.3) dans chaque couche où l'indice de réfraction est constant ensuite à écrire les conditions aux limites aux interfaces.

Le champ $E_y(x)$ de l'équation (2.3) a pour expression suivant les différentes couches :

$$E_y(x) = \begin{cases} A_1 \exp(k_1 x) & x \leq 0 \\ A_2 \exp(j \cdot k_2 \cdot x) + B_2 \cdot \exp(-j \cdot k_2 \cdot x) & 0 < x \leq d \\ A_3 \exp(-k_3(x - d)) & x > d \end{cases} \quad (2.5)$$

$$\text{Où : } k_1^2 = \beta^2 - n_1^2 \cdot k_0^2 \quad , \quad k_2^2 = n_2^2 \cdot k_0^2 - \beta^2 \quad \text{et} \quad k_3^2 = \beta^2 - n_3^2 \cdot k_0^2$$

b. Conditions aux limites :

Les composantes tangentielles E_y et H_z du champ électromagnétique doivent être continus aux interfaces.

Et comme H_z est proportionnel à dE_y/dx , donc les conditions aux limites se résument en la continuité du champ électrique et sa dérivée aux interfaces.

On applique les relations de continuité aux interfaces :

$$\text{à } x = 0 \Rightarrow \begin{cases} A_1 - A_2 - B_2 = 0 \\ A_1 \cdot k_1 - A_2 \cdot j \cdot k_2 + B_2 \cdot j \cdot k_2 = 0 \end{cases} \quad (2.6)$$

$$\text{à } x = d \Rightarrow \begin{cases} A_2 \cdot \exp(j \cdot k_2 \cdot d) + B_2 \exp(-j \cdot k_2 \cdot d) - A_3 = 0 \\ A_2 \cdot j \cdot k_2 \cdot \exp(j \cdot k_2 \cdot d) - B_2 \cdot j \cdot k_2 \cdot \exp(-j \cdot k_2 \cdot d) + k_3 \cdot A_3 = 0 \end{cases} \quad (2.7)$$

c. Equation aux valeurs propres :

D'après l'ensemble des équations précédentes, déduit des conditions aux limites, on a à résoudre le système à quatre équations suivant :

$$\begin{bmatrix} 1 & -1 & -1 & 0 \\ k_1 & -j \cdot k_2 & j \cdot k_2 & 0 \\ 0 & \exp(j \cdot k_2 \cdot d) & \exp(-j \cdot k_2 \cdot d) & -1 \\ 0 & j \cdot k_2 \cdot \exp(j \cdot k_2 \cdot d) & -j \cdot k_2 \cdot \exp(-j \cdot k_2 \cdot d) & k_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ B_2 \\ A_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Ce système admet des solutions non nulles si le déterminant de la matrice est nul. Ce qui conduit à l'équation :

$$k_2 d = \tan^{-1} \left(\frac{k_1}{k_2} \right) + \tan^{-1} \left(\frac{k_3}{k_2} \right) + M\pi \quad (2.9)$$

Cette dernière est appelée équation aux valeurs propres.

La résolution de cette équation permet de déterminer la constante de propagation et donc l'indice effectif des différents modes, ainsi que les composantes du champ électromagnétiques.

$M = 0, 1, 2, \dots$ étant l'ordre du mode.

Pour le cas d'un guide d'onde symétrique à trois couches ($n_1 = n_3 \Leftrightarrow k_1 = k_3$) et l'équation aux valeurs propres devient :

$$k_1 d = 2 \tan^{-1} \left(\frac{k_2}{k_1} \right) + M\pi \quad (2.10)$$

2.3.2 Le mode TM :

On étudie ce guide pour les modes TM qui sont décrits par l'expression du champ magnétique H_y , se propageant dans la direction de l'axe des Z, par l'équations :

$$H_y(y, z, t) = H_y(x) \cdot \exp[i(\omega \cdot t - \beta \cdot z)] \quad (2.11)$$

ω : La pulsation

β : La constante de propagation.

a. Equation d'onde :

Les composantes du champ électromagnétique obéissent aux expressions suivantes déduites des équations de Maxwell :

$$\begin{cases} H_x = 0 \\ \frac{d^2 H_y}{dx^2} + (n^2 \cdot k_0^2 - \beta^2) \cdot E_y = 0 \\ H_z = 0 \end{cases} \quad (2.12)$$

$$\begin{cases} E_x = \left(\frac{\beta}{\omega \cdot \mu_0}\right) \cdot H_y \\ E_y = 0 \\ E_z = \left(\frac{1}{j \cdot \omega \cdot \varepsilon}\right) \cdot \frac{dH_y}{dx} \end{cases} \quad (2.12^*)$$

La solution générale de la deuxième équation de l'ensemble (2.12) est de la forme :

$$H_y(x) = A \cdot \exp(\alpha \cdot x) + B \cdot \exp(-\alpha \cdot x) \quad (2.13)$$

$$\text{Avec : } \alpha = (\beta^2 - n^2 \cdot k_0^2)^{1/2}$$

La méthode de détermination du champ électromagnétique dans le guide consiste à résoudre l'équation (2.10) dans chaque couche où l'indice de réfraction est constant ensuite à écrire les conditions aux limites aux interfaces.

Le champ $H_Y(x)$ de l'équation (2.12) a pour expression suivant les différentes couches :

$$H_y(x) = \begin{cases} A_1 \cdot \exp(k_1 x) & x \leq 0 \\ A_2 \cdot \exp(j \cdot k_2 \cdot x) + B_2 \cdot \exp(-j \cdot k_2 \cdot x) & 0 < x \leq d \\ A_3 \exp(-k_3(x - d)) & x > d \end{cases} \quad (2.14)$$

$$\text{Ou : } k_1^2 = \beta^2 - n_1^2 \cdot k_0^2 \quad \text{et} \quad k_2^2 = n_2^2 \cdot k_0^2 - \beta^2 \quad k_3^2 = \beta^2 - n_3^2 \cdot k_0^2$$

b. condition aux limites :

Les composantes tangentielles H_y et E_z du champ électromagnétique doivent être continues aux interfaces.

Et comme E_z est proportionnel à $\frac{1}{n_1^2} \frac{dH_y}{dx}$, donc les conditions aux limites se résument en la continuité de H_y et $\frac{1}{n_1^2} \frac{dH_y}{dx}$ aux interfaces

$$\text{à } x = 0 \quad \Rightarrow \quad \begin{cases} A_1 = A_2 + B_2 \\ \frac{k_1 A_1}{n_1^2} = \frac{j k_2 A_2}{n_2^2} - \frac{j k_2 B_2}{n_2^2} \end{cases} \quad (2.15)$$

$$\text{à } x = d \Rightarrow A_2 \cdot \exp(j \cdot k_2 \cdot d) + B_2 \cdot \exp(-j \cdot k_2 \cdot d) - A_3 = 0 \quad (2.16)$$

$$\frac{j \cdot k_2 \cdot A_2 \cdot \exp(j \cdot k_2 \cdot d)}{n_2^2} - \frac{-j \cdot k_2 \cdot B_2 \cdot \exp(-j \cdot k_2 \cdot d)}{n_2^2} + \frac{A_3 \cdot k_3}{n_3^2} = 0 \quad (2.17)$$

c. Equation aux valeurs propres :

D'après l'ensemble des équations précédentes, déduit des conditions aux limites, on a résolu le système à quatre équations suivant :

$$\begin{bmatrix} 1 & -1 & -1 & 0 \\ \frac{k_1}{n_1^2} & \frac{-j \cdot k_2}{n_2^2} & \frac{j \cdot k_2}{n_2^2} & 0 \\ 0 & \exp(j \cdot k_2 \cdot d) & \exp(-j \cdot k_2 \cdot d) & -1 \\ 0 & \frac{j \cdot k_2 \cdot \exp(j \cdot k_2 \cdot d)}{n_2^2} & \frac{-j \cdot k_2 \cdot \exp(-j \cdot k_2 \cdot d)}{n_2^2} & \frac{k_3}{n_3^2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ B_2 \\ A_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

Ce système admet des solutions non nulles si le déterminant de la matrice est nul. Ce qui conduit à l'équation :

$$k_2 d = \tan^{-1} \left(\frac{k_1 \cdot n_2^2}{k_2 \cdot n_1^2} \right) + \tan^{-1} \left(\frac{k_3 \cdot n_2^2}{k_2 \cdot n_3^2} \right) + M\pi \quad (2.19)$$

Cette dernière est appelée équation aux valeurs propres.

La résolution de cette équation permet de déterminer la constante de propagation et donc l'indice effectif des différents modes, ainsi que les composantes du champ électromagnétique.

$M = 0, 1, 2, \dots$ étant l'ordre du mode.

Pour le cas d'un guide d'onde symétrique à trois couches ($n_1 = n_3 \Leftrightarrow k_1 = k_3$) et l'équation aux valeurs propres devient :

$$k_1 d = 2 \tan^{-1} \left(\frac{k_2 \cdot n_1^2}{k_1 \cdot n_2^2} \right) + M\pi \quad (2.20)$$

2.4 Présentations des outils de simulation :

2.4.1 Mathcad (version15) :

Mathcad est un environnement de traitement riche qui propose un grand choix d'outils et prend en charge diverses techniques d'analyse et de visualisation. C'est un outil unique et puissant permettant de travailler sur des équations, des nombres, du texte et des graphiques. A la différence de tous les autres logiciels de mathématiques, Mathcad réalise des opérations en procédant exactement comme vous avez l'habitude de le faire. L'interface écran de Mathcad est un document vierge dans lequel vous pouvez saisir des équations, des données graphiques ou des fonctions, ainsi des annotations en n'importe quel endroit de la page. De plus au lieu de vous obliger à adopter une syntaxe de programmation, Mathcad vous permet d'employer le langage mathématique.

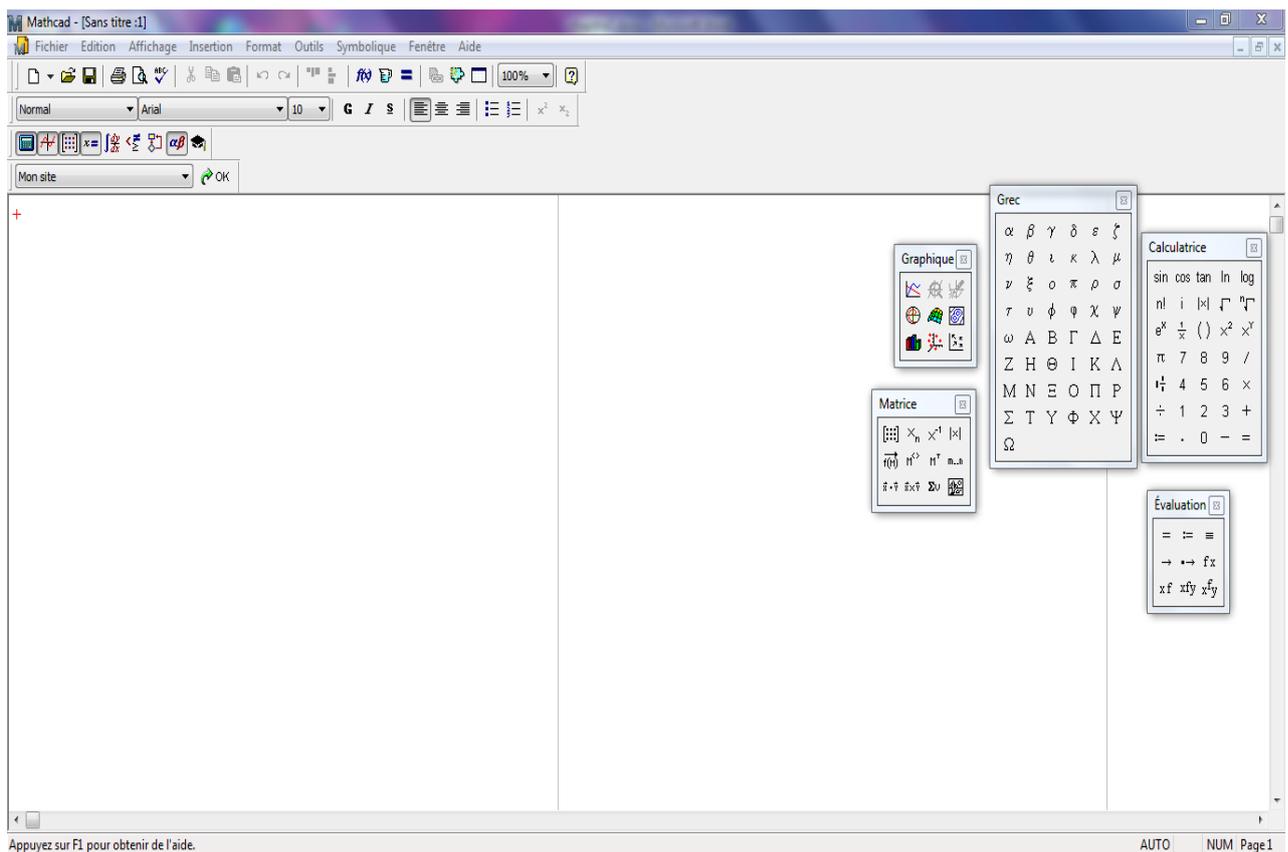


Figure2.3: Fenêtre de commande de l'environnement MATHCAD.

2.4.2 COMSOL Multiphysics (version 4.0a)

COMSOL Multiphysics est un logiciel de simulation numérique basé sur la méthode des éléments finis. Ce logiciel permet de simuler de nombreuses physiques et applications en ingénierie, et tout particulièrement les phénomènes couplés ou simulation multiphysiques [7].

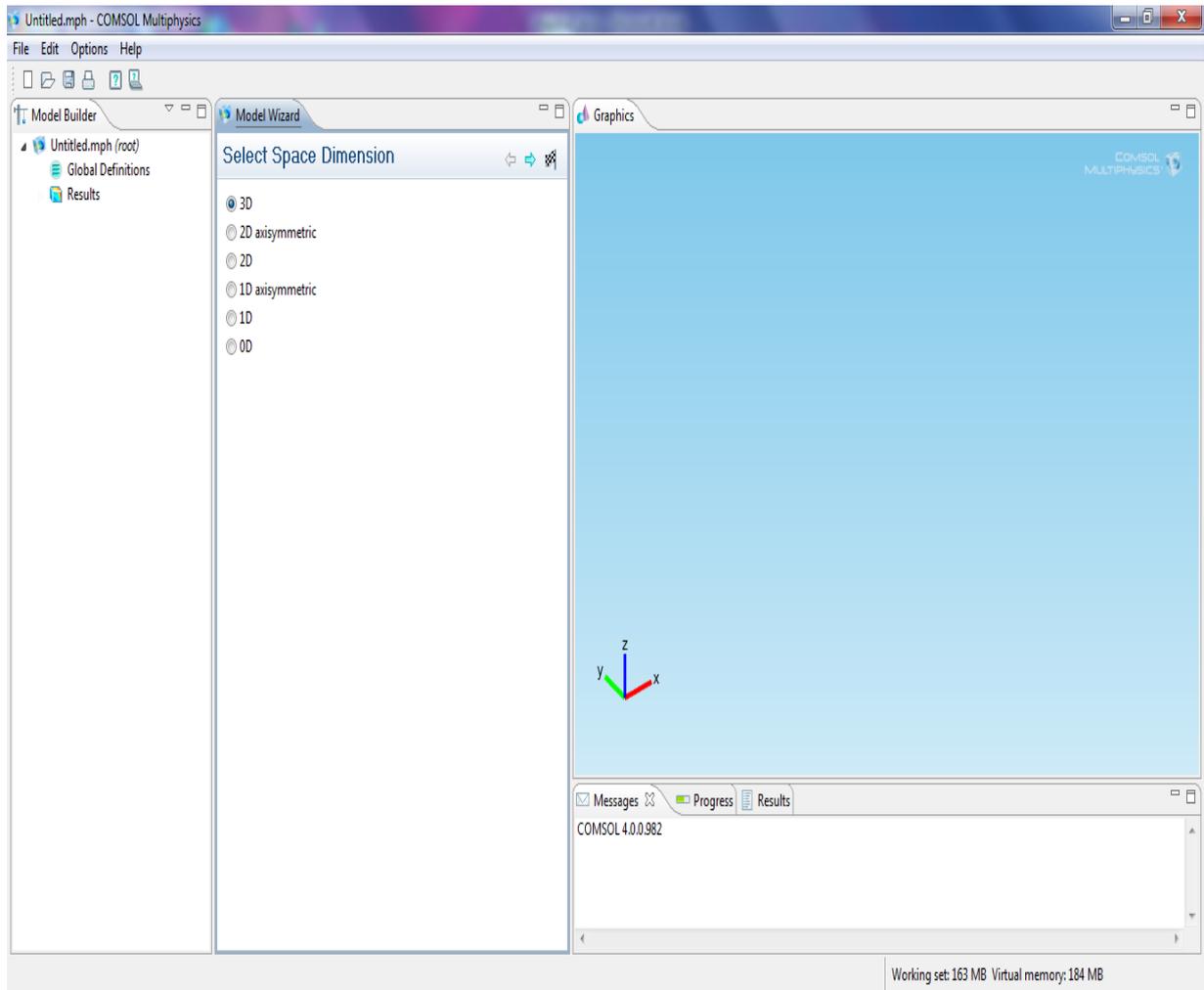


Figure 2.4 : Fenêtre de commande de Comsol.

2.5 Résultats et discussions de simulation :

2.5.1 Etude d'un guide de lumière plan non symétrique à trois couches :

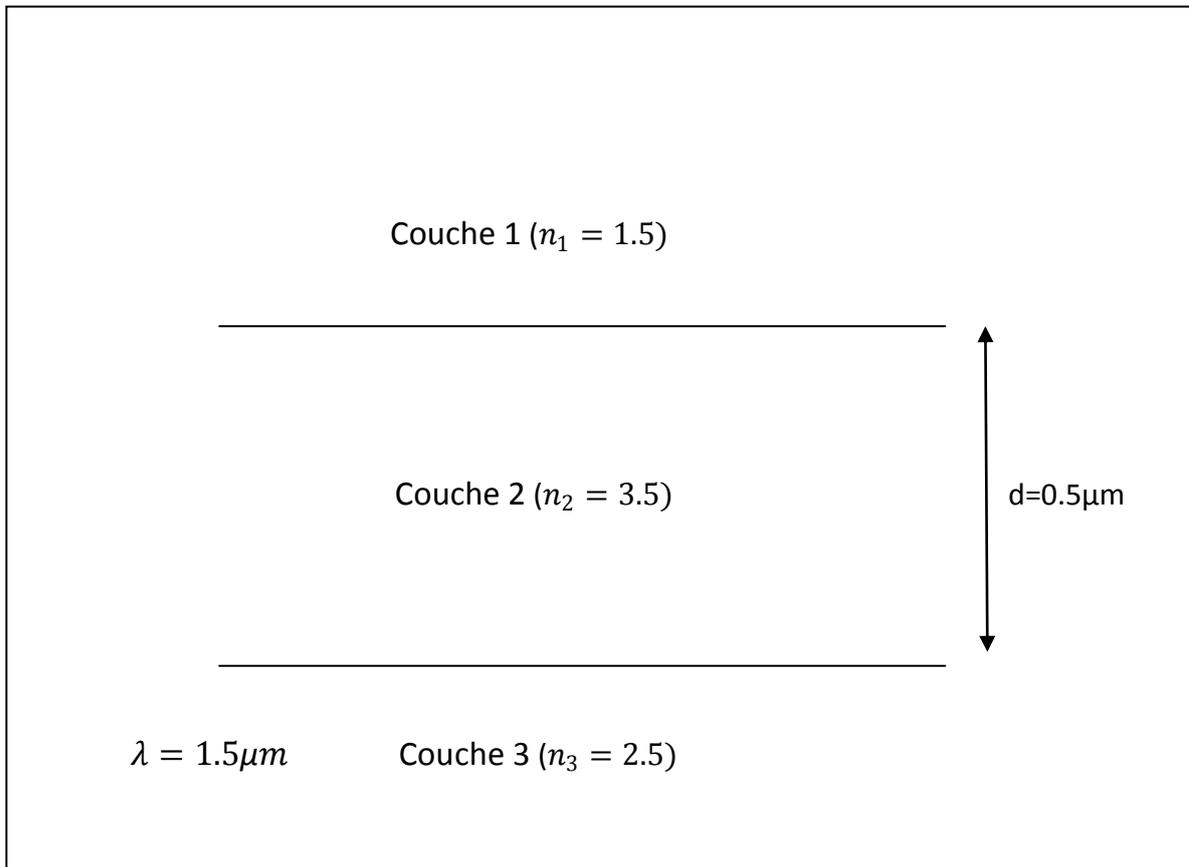


Figure 2.5 : Géométrie du guide de lumière plan à trois couches non symétrique.

a. Le mode TE (Transverse Electrique) :

1. l'indice effectif en fonction des paramètres géométriques de la structure :

Les figures « 2.6 », « 2.7 » et « 2.8 » représentent les variations de l'indice effectif en fonction de l'épaisseur, l'indice de réfraction de la couche guidante et la longueur d'onde. L'indice effectif croit lorsque l'épaisseur et l'indice de réfraction de la couche guidante augmentent et décroît lorsque la longueur d'onde augmente.

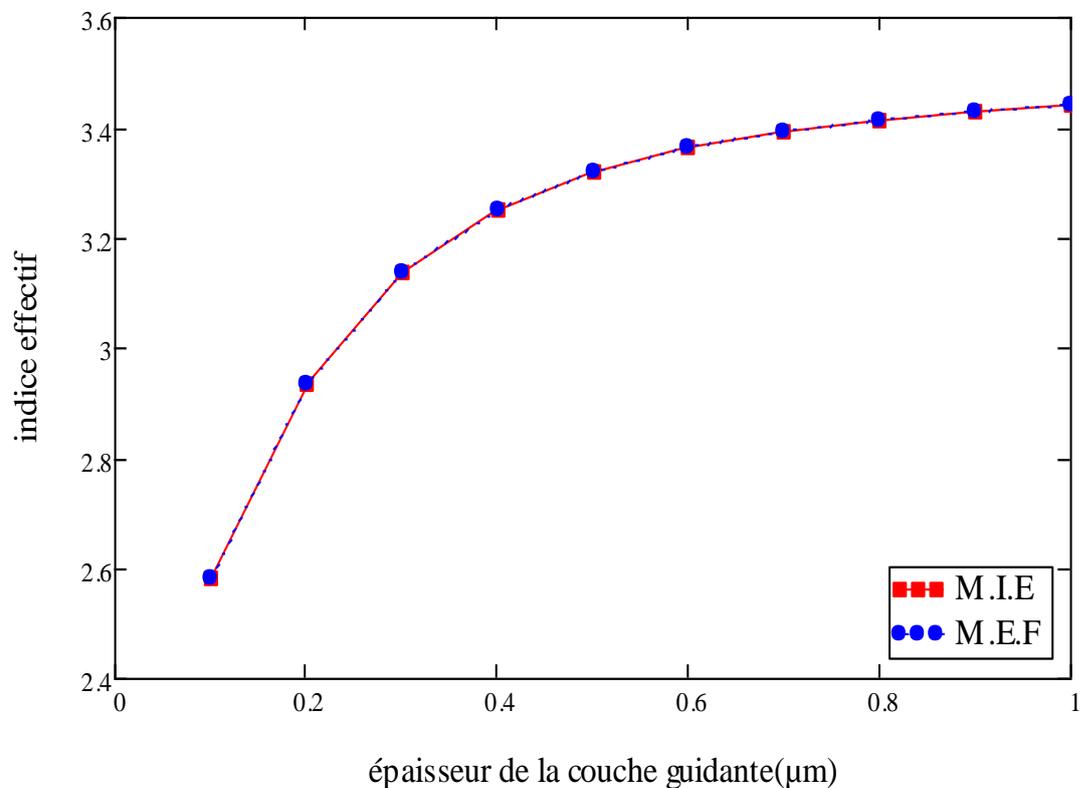


Figure 2.6: Variation de l'indice effectif en fonction de l'épaisseur de la couche guidante.

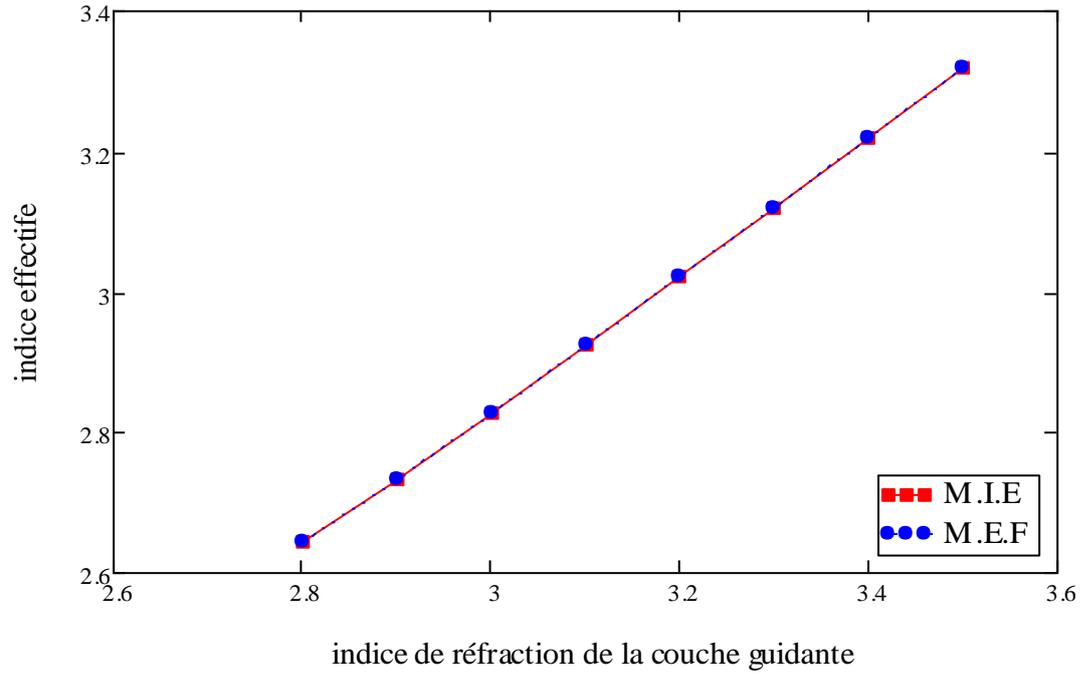


Figure 2.7: Variation de l'indice effectif en fonction de l'indice de réfraction de la couche guidante.

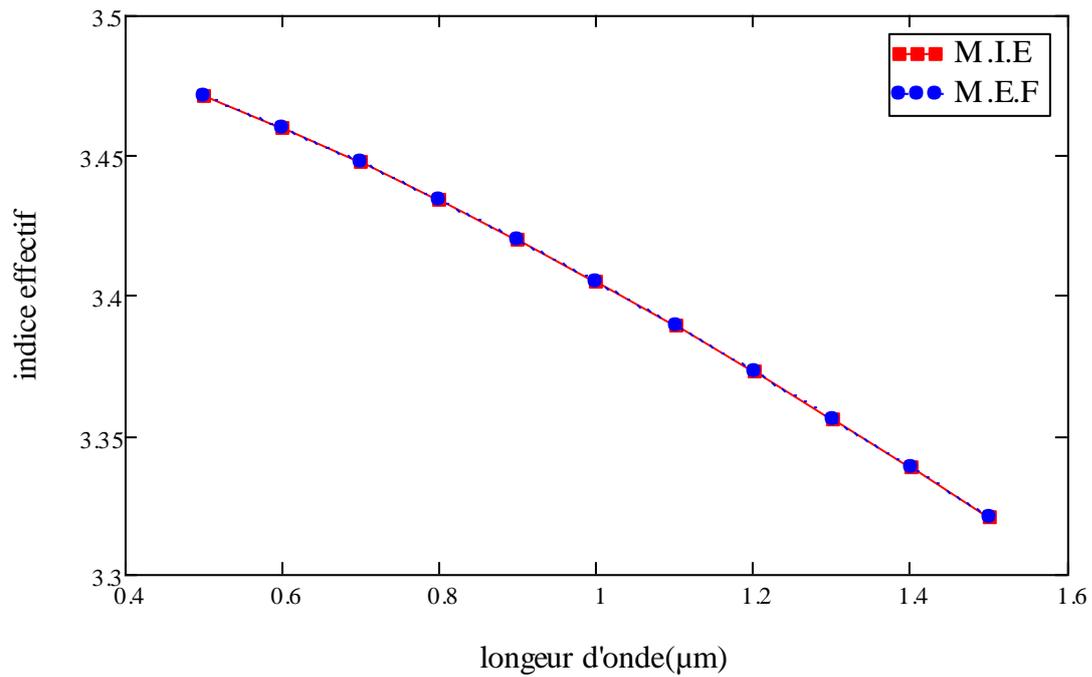


Figure 2.8 : Variation de l'indice effectif en fonction de la longueur d'onde.

2. Le facteur de confinement en fonction des paramètres géométriques de la structure :

Les figures « 2.9 », « 2.10 » et « 2.11 » illustrent les variations du facteur de confinement en fonction de l'épaisseur et l'indice de réfraction de la couche guidante et la longueur d'onde. Le facteur de confinement croît lorsque l'épaisseur et l'indice de réfraction de la couche guidante augmentent et décroît lorsque la longueur d'onde augmente.

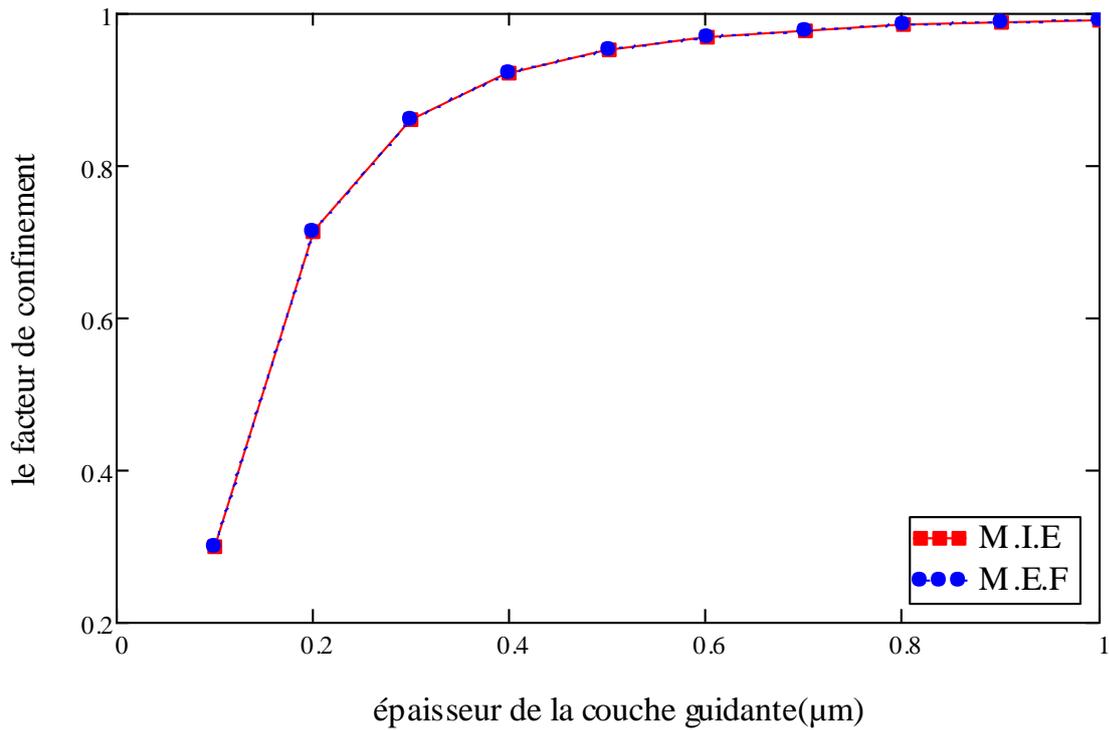


Figure 2.9 : Variation du facteur de confinement en fonction de l'épaisseur de la couche guidante.

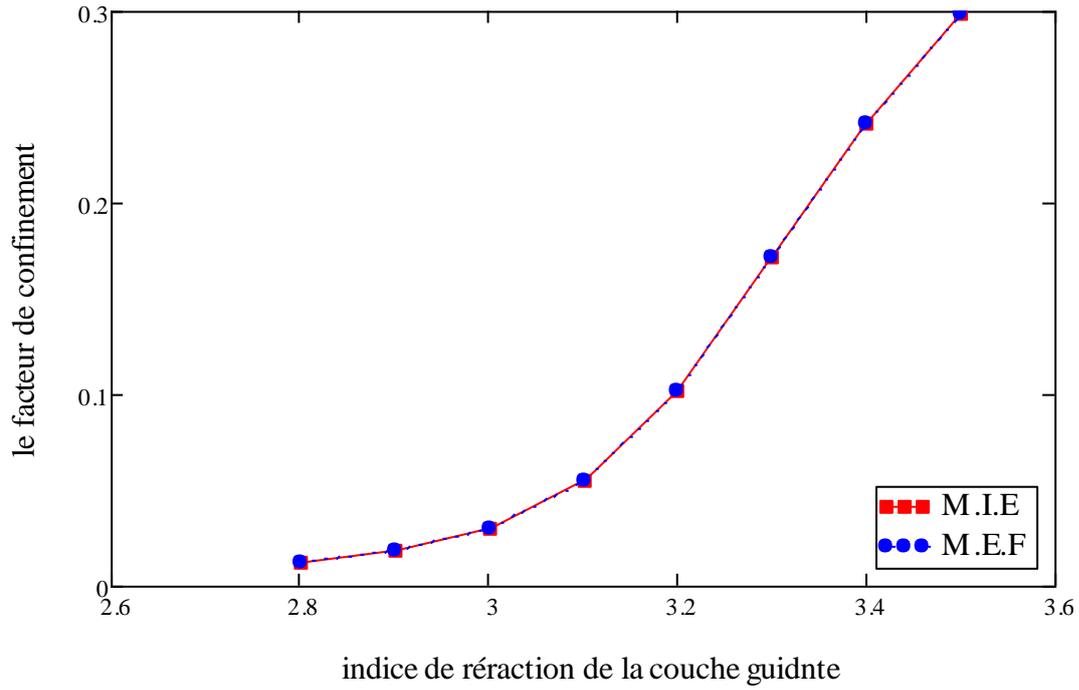


Figure 2.10 : Variation du facteur de confinement en fonction de l'indice de réfraction de la couche guidante.

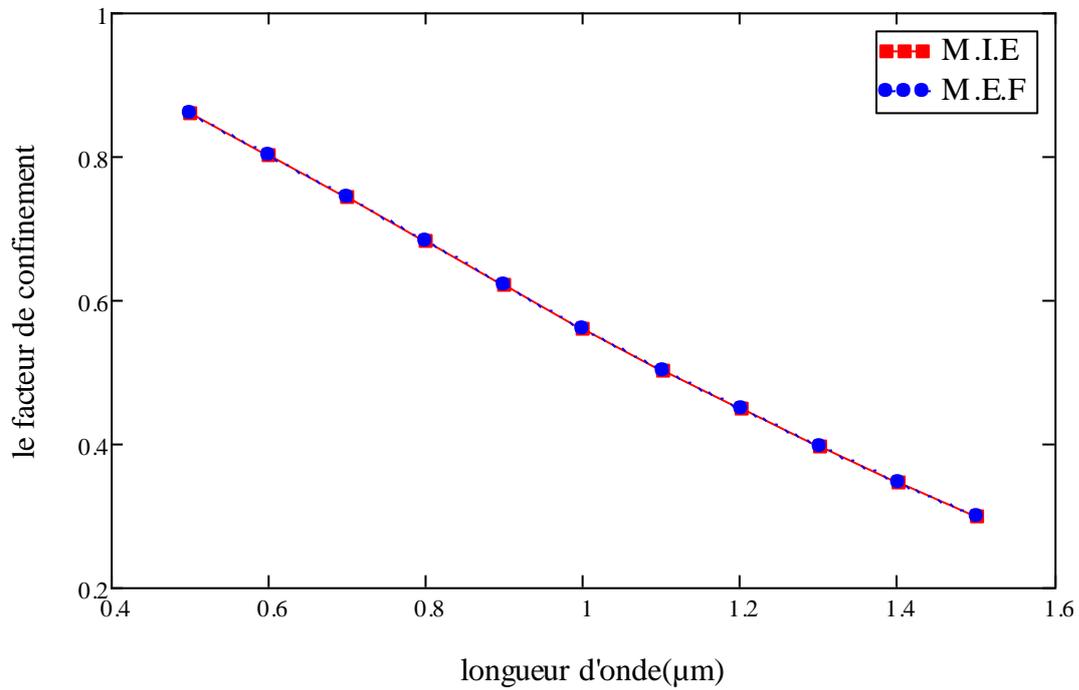


Figure 2.11: Variation du facteur de confinement en fonction de la longueur d'onde.

b. mode TM (transverse magnétique) :

1. L'indice effectif en fonction des paramètres géométriques de la structure :

Les figures « 2.12 », « 2.13 » et « 2.14 » montrent les variations l'indice effectif en fonction de l'épaisseur et l'indice de réfraction de la couche guidante et la longueur d'onde. L'indice effectif croit lorsque l'épaisseur et l'indice de réfraction de la couche guidante augmentent et décroît lorsque la longueur d'onde augmente.

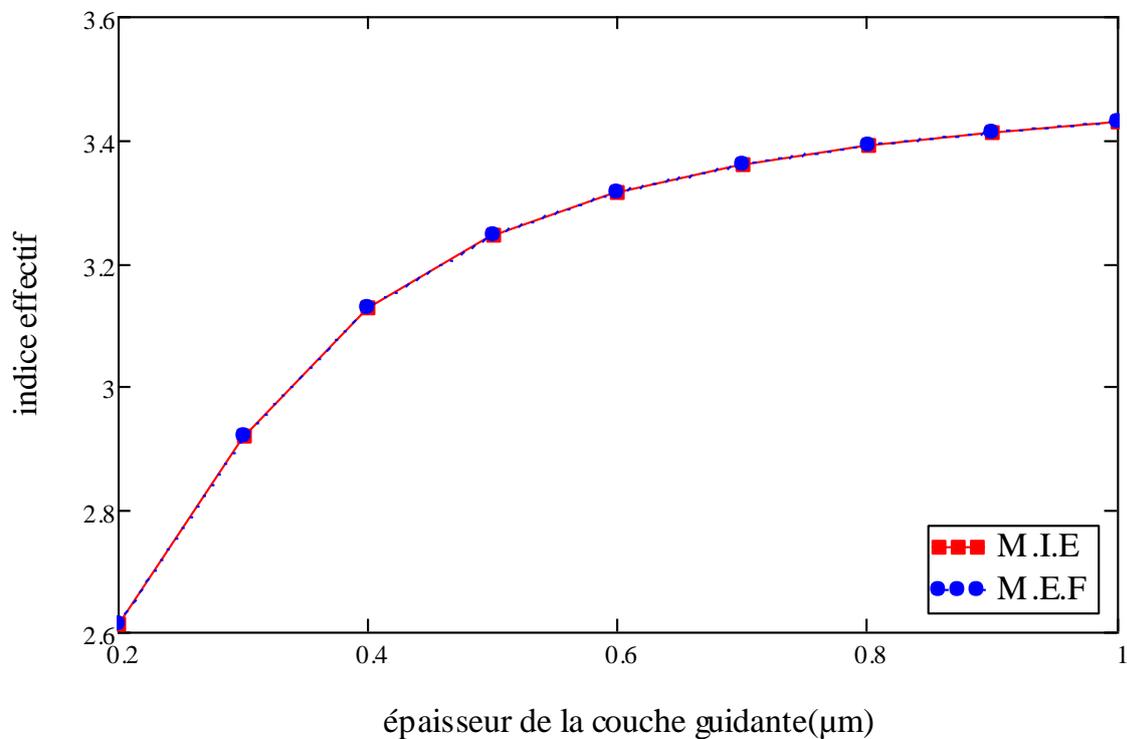


Figure. 2.12 : Variation de l'indice effectif en fonction de l'épaisseur de la couche guidante

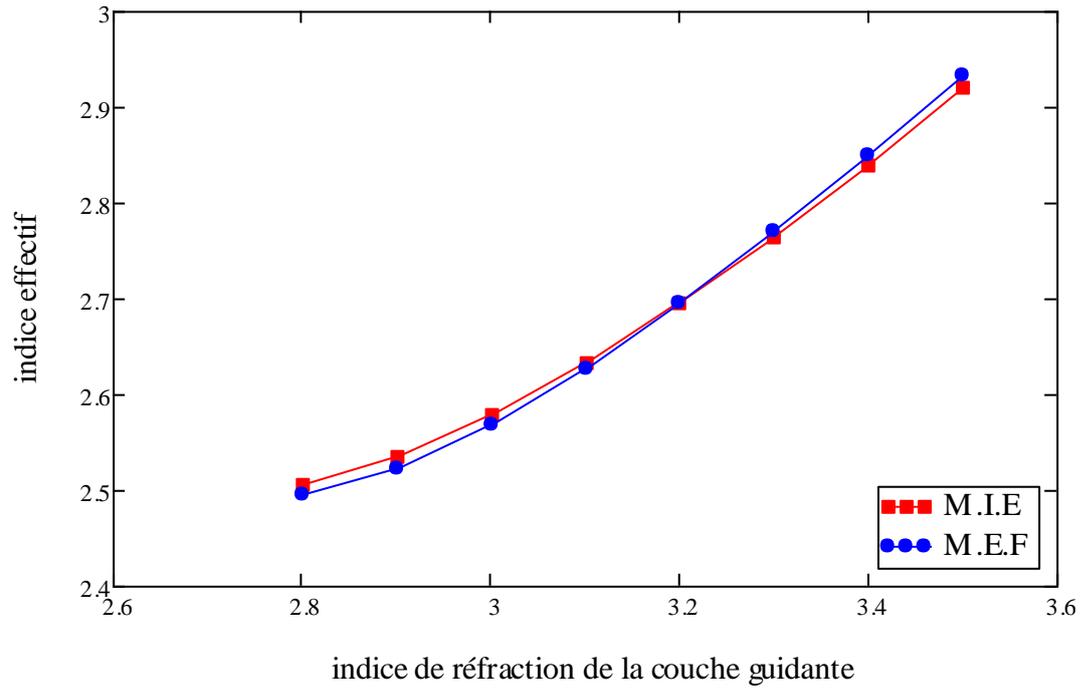


Figure 2.13 : Variation de l'indice effectif en fonction de l'indice de réfraction de la couche guidante.

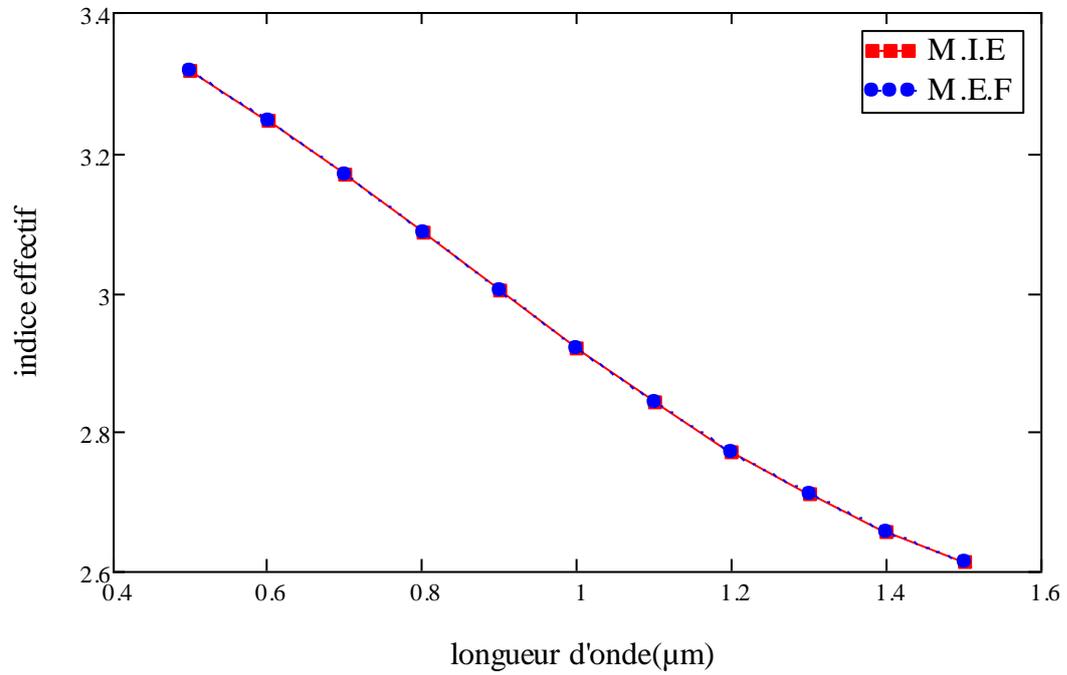


Figure 2.14 : Variation de l'indice effectif en fonction de la longueur d'onde.

2. Le facteur de confinement en fonction des paramètres géométriques de la structure :

Les figures «2.15 », « 2.16 » et « 2.17 » représentent les variations du facteur de confinement en fonction de l'épaisseur et l'indice de réfraction de la couche guidante et la longueur d'onde. Le facteur de confinement croît lorsque l'épaisseur de la couche guidante augmente après il atteint son maximum pour $d \approx 0.4\mu m$ et croît aussi lorsque l'indice de réfraction de la couche guidante augmente et finalement il décroît lorsque la longueur d'onde augmente.

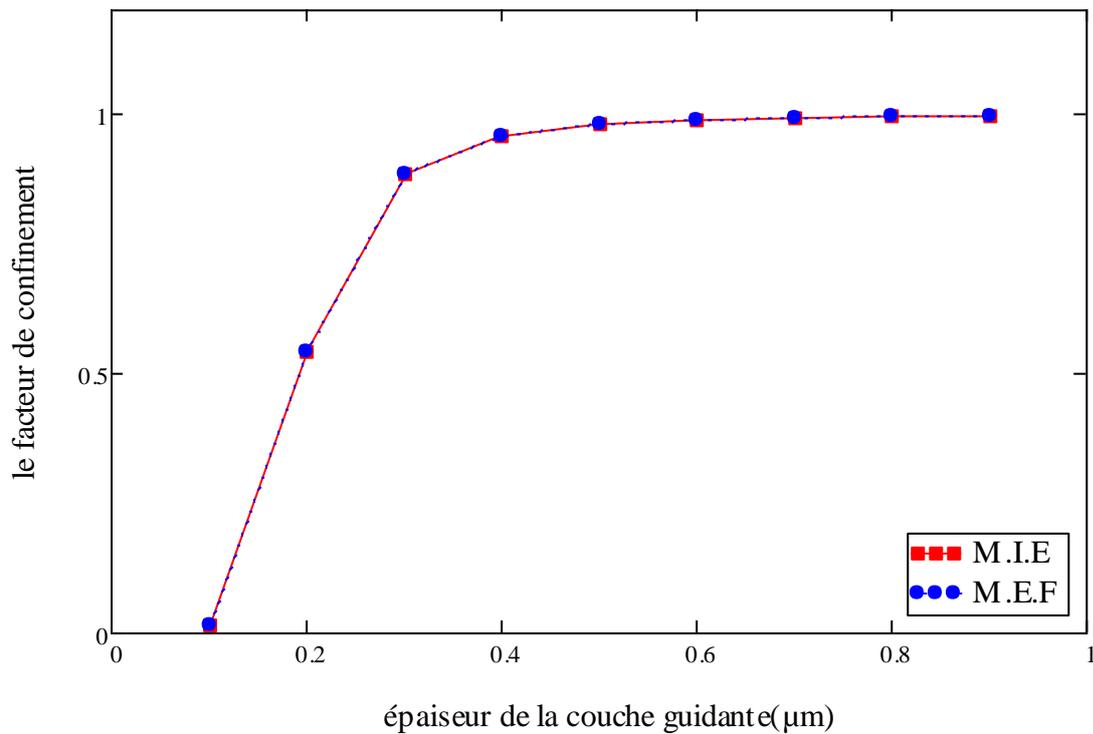


Figure 2.15 : Variation du facteur de confinement en fonction de l'épaisseur de la couche guidante.

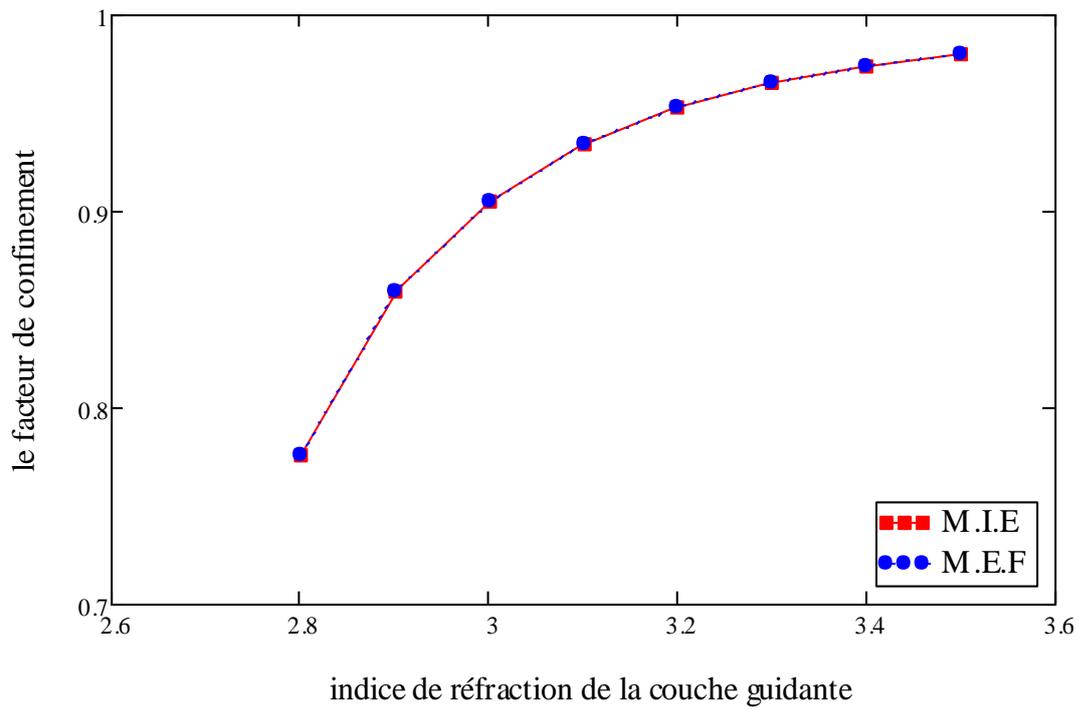


Figure 2.16: Variation du facteur de confinement en fonction de l'indice de réfraction de la couche guidante.

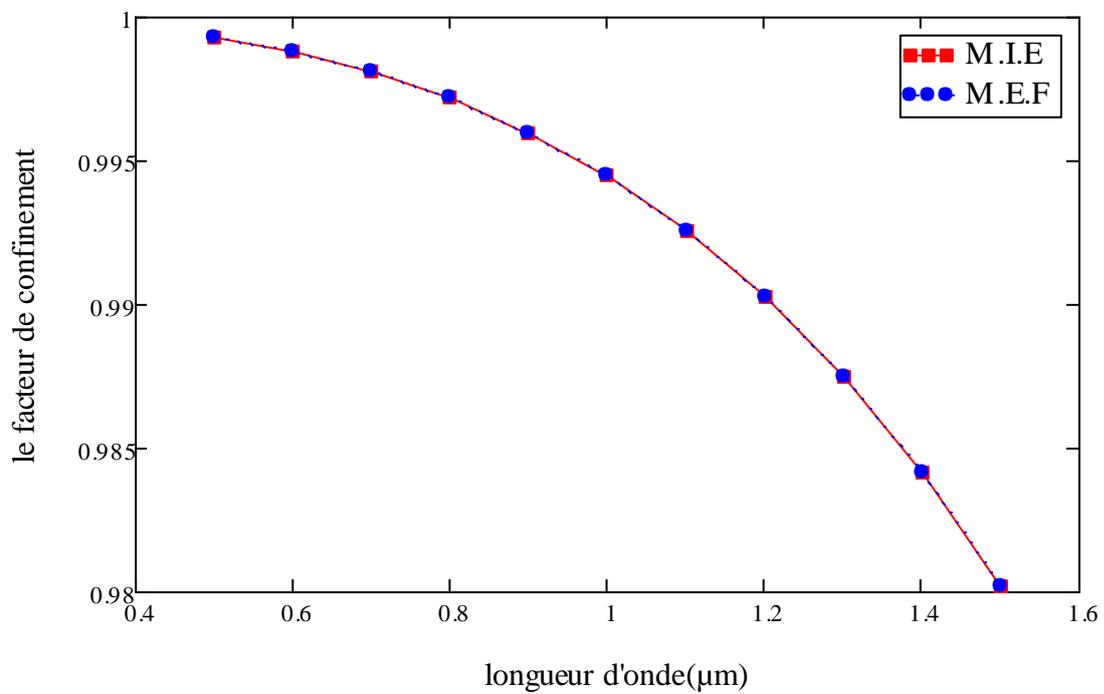


Figure 2.17 : Variation du facteur de confinement en fonction de la longueur d'onde

2.5.2 Interprétations des résultats :

D'après les résultats obtenus dans la simulation on remarque que l'indice effectif et le coefficient de confinement sont plus grands dans le mode TE par rapport au mode TM, donc le guide de lumière est plus performant dans le mode TE.

2.5.3 Etude d'un guide de lumière plan symétrique à trois couches :

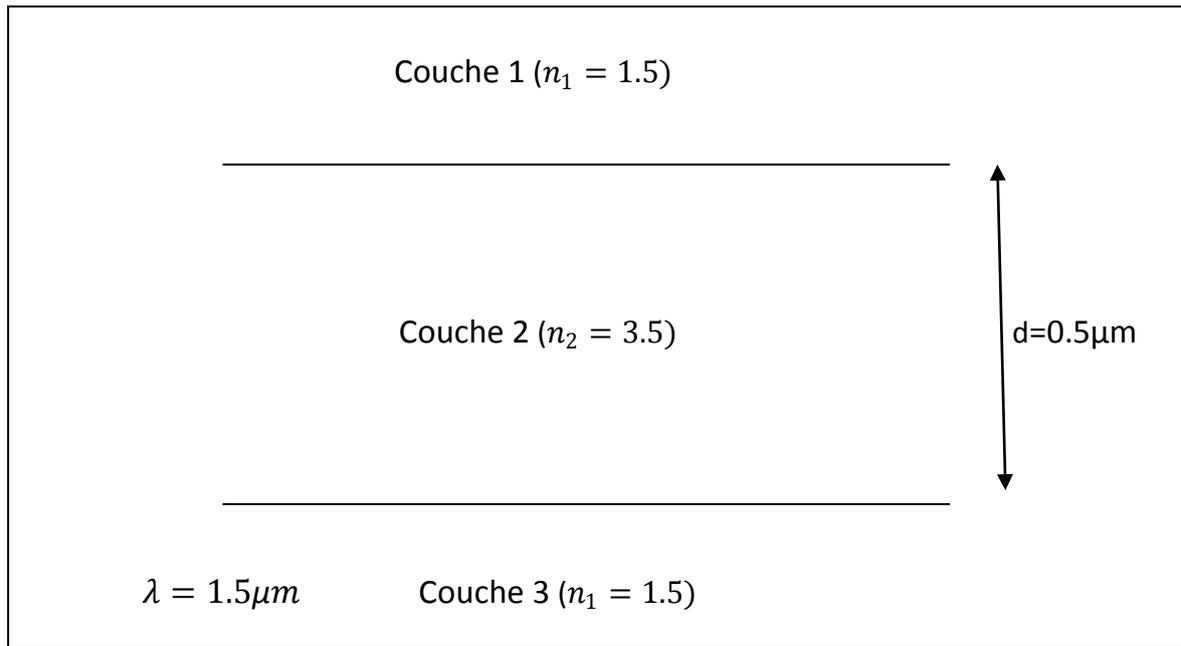


Figure 2.18 : Géométrie du guide de lumière plan à trois couches symétrique.

a. Le mode TE (Transverse Electrique) :

1. l'indice effectif en fonction des paramètres géométriques de la structure :

Les figures « 2.19 », « 2.20 » et « 2.21 » représentent les variations de l'indice effectif en fonction de l'épaisseur, de l'indice de réfraction de la couche guidante et de la longueur d'onde. L'indice effectif croit lorsque l'épaisseur et l'indice de réfraction de la couche guidante augmentent et décroît lorsque la longueur d'onde augmente.

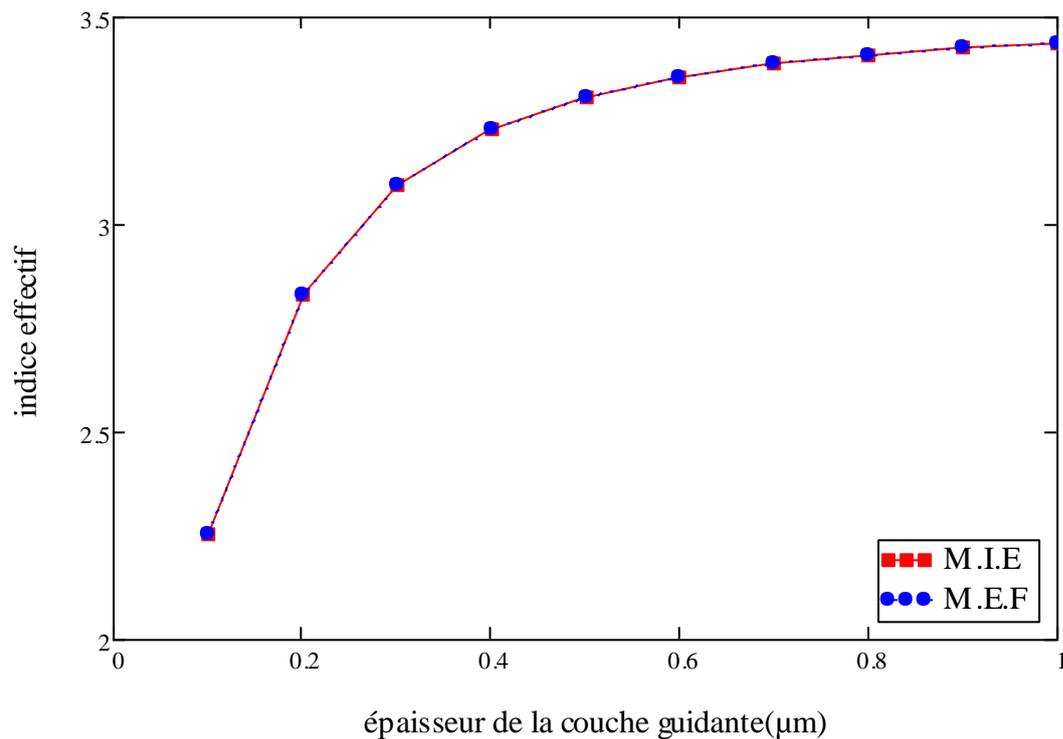


Figure 2.19: Variation de l'indice effectif en fonction de l'épaisseur de la couche guidante.

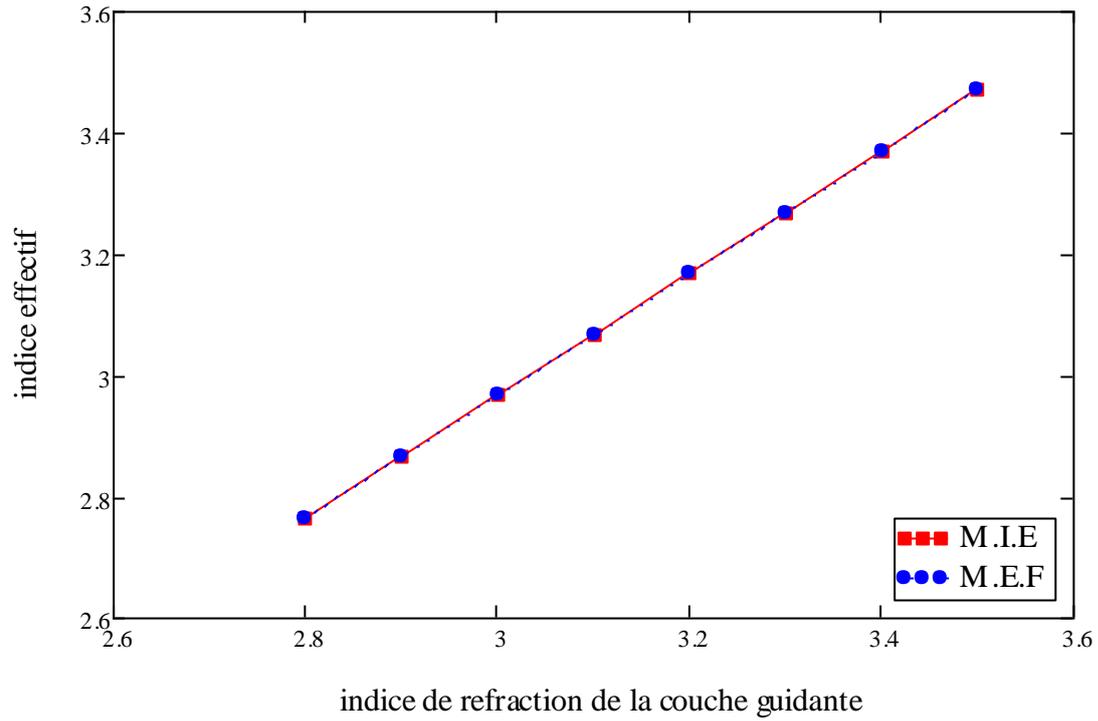


Figure 2.20 : Variation de l'indice effectif en fonction de l'indice de réfraction de la couche guidante.

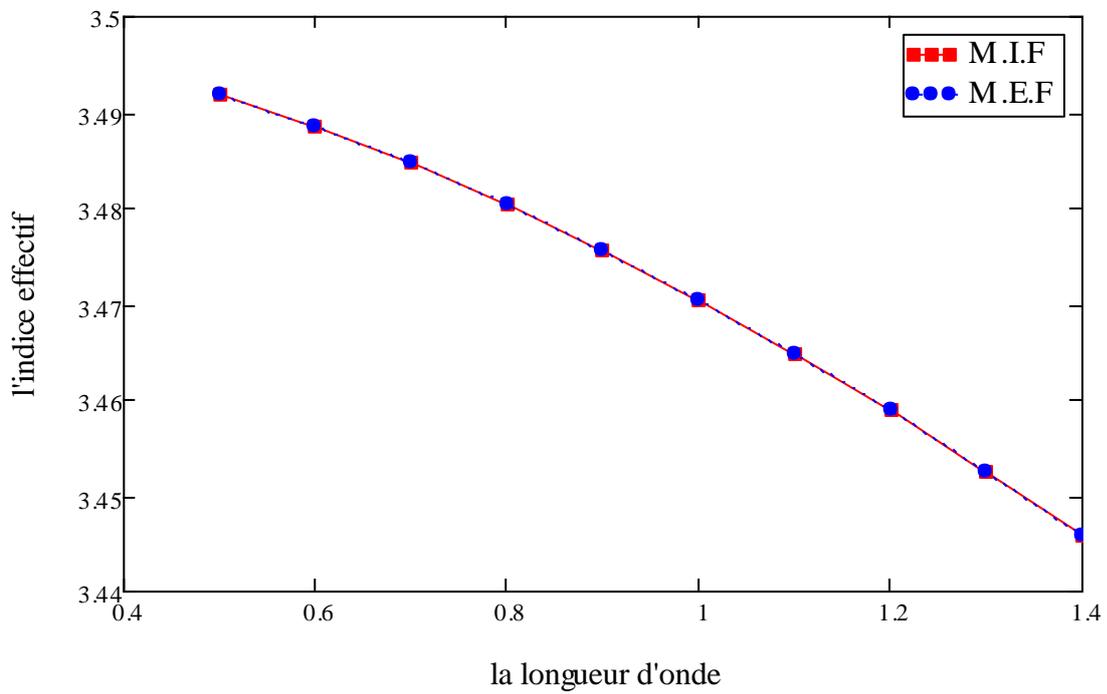


Figure 2.21 : Variation de l'indice effectif en fonction de la longueur d'onde.

2. Le facteur de confinement en fonction des paramètres géométriques de la structure :

Les figures « 2.22 », « 2.23 » et « 2.24 » illustrent les variations du facteur de confinement en fonction de l'épaisseur, de l'indice de réfraction de la couche guidante et de la longueur d'onde. Le facteur de confinement croit lorsque l'épaisseur et l'indice de réfraction de la couche guidante augmentent et décroît lorsque la longueur d'onde augmente.

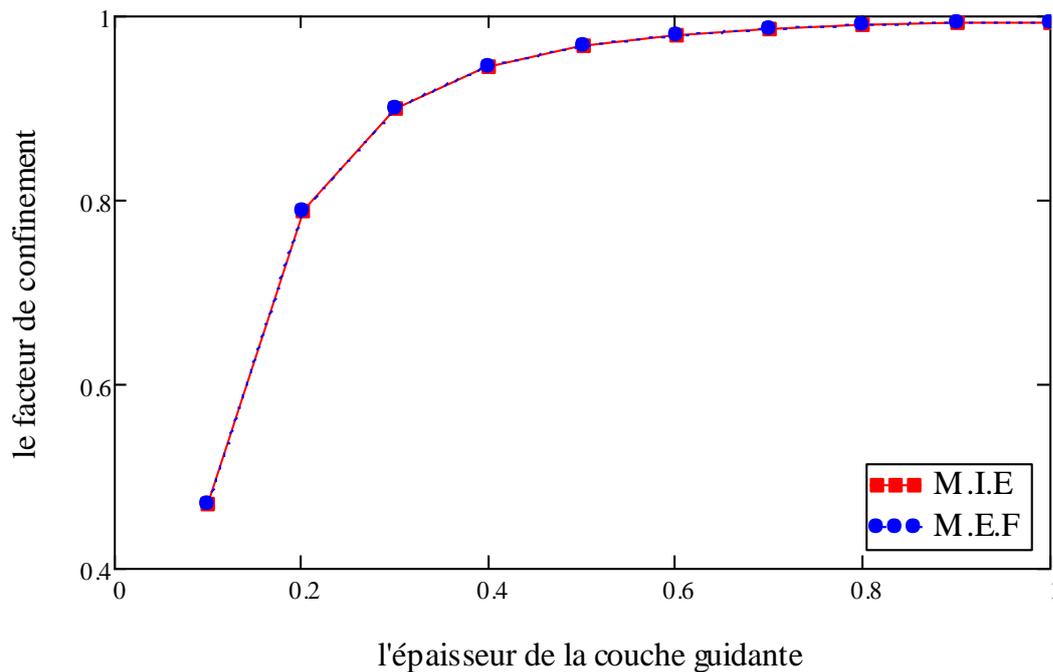


Figure 2.22: Variation du facteur de confinement en fonction de l'épaisseur de la couche guidante.

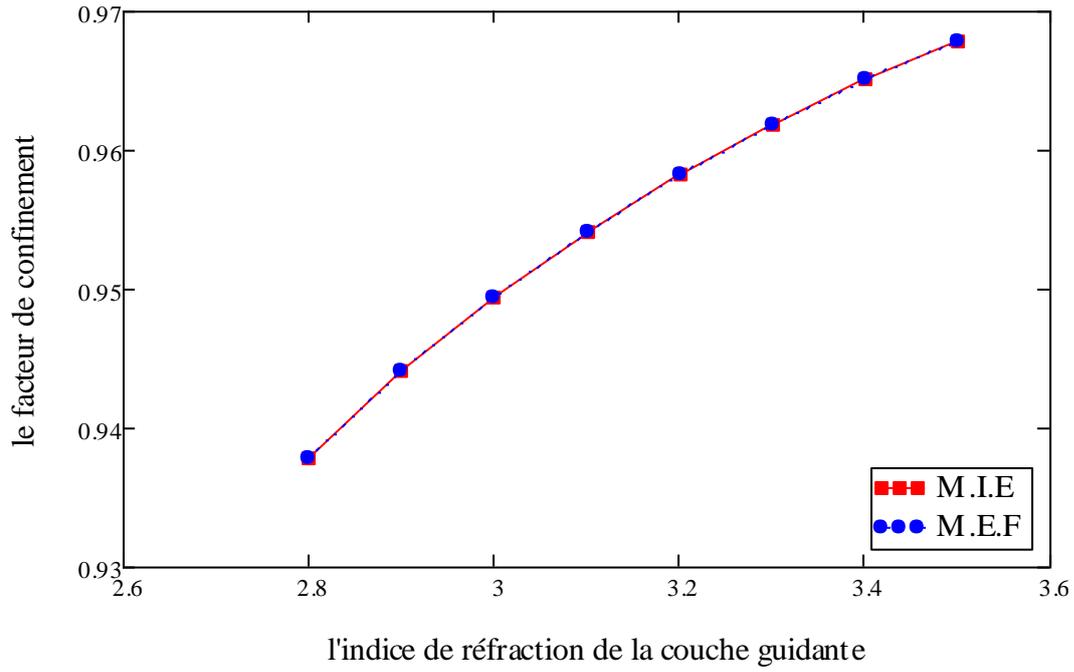


Figure 2.23 : Variation du facteur de confinement en fonction de la l'indice de réfraction de la couche guidante.

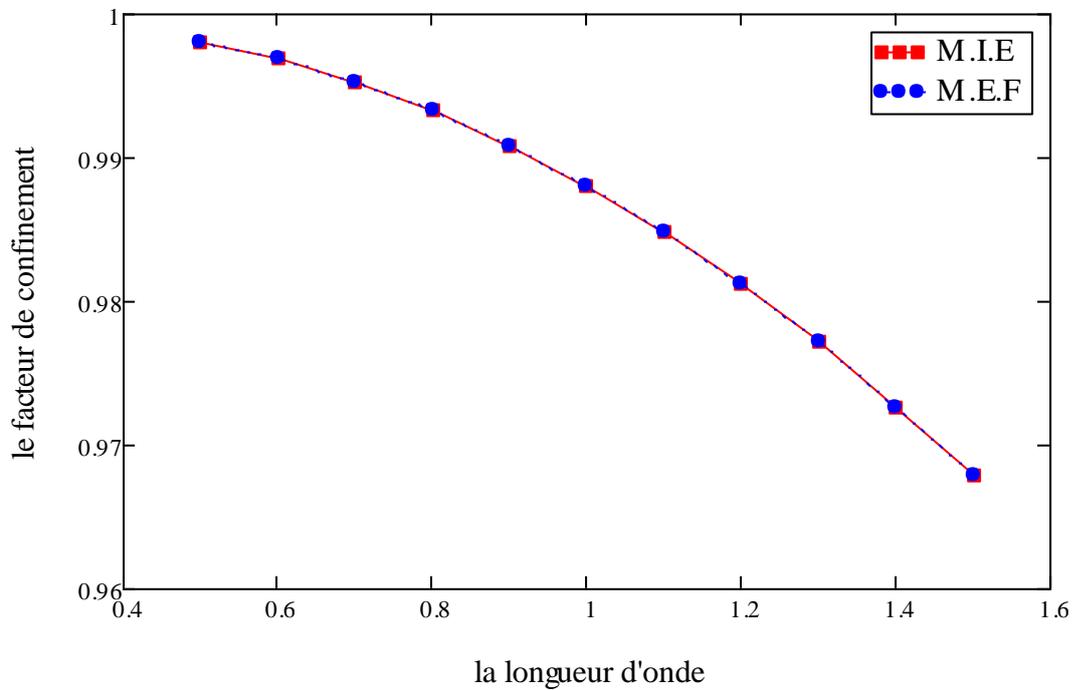


Figure 2.24 : Variation du facteur de confinement en fonction de la longueur d'onde.

b. Le mode TM (Transverse Magnétique) :

1. l'indice effectif en fonction des paramètres géométriques de la structure :

Les figures « 2.25 », « 2.26 » et « 2.27 » montrent les variations de l'indice effectif en fonction de l'épaisseur, de l'indice de réfraction de la couche guidante et de la longueur d'onde. L'indice effectif croît lorsque l'épaisseur et l'indice de réfraction de la couche guidante augmentent et décroît lorsque la longueur d'onde augmente.

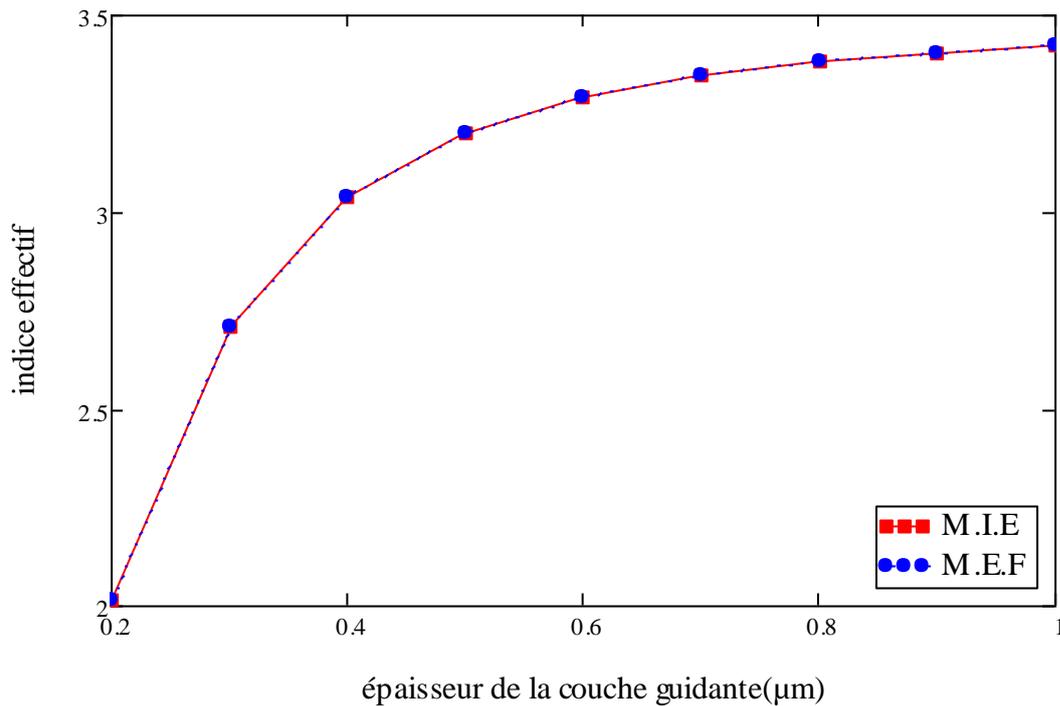


Figure 2.25 : Variation de l'indice effectif en fonction de l'épaisseur de la couche guidante.

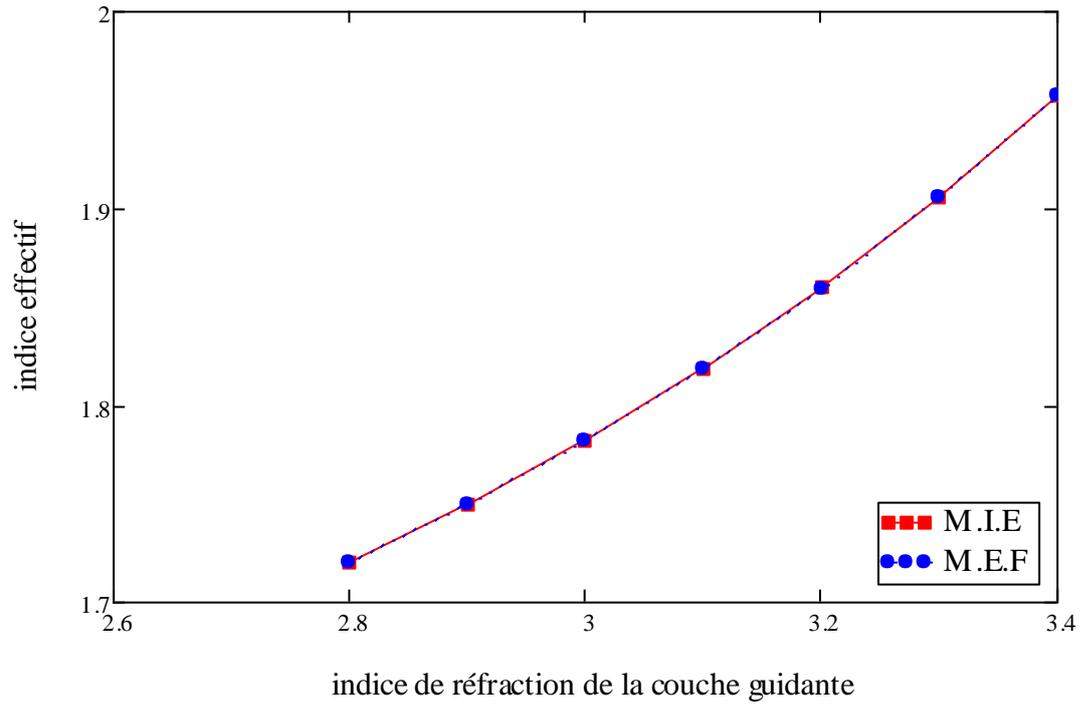


Figure 2.26 : Variation de l'indice effectif en fonction de l'indice de réfraction de la couche guidante.

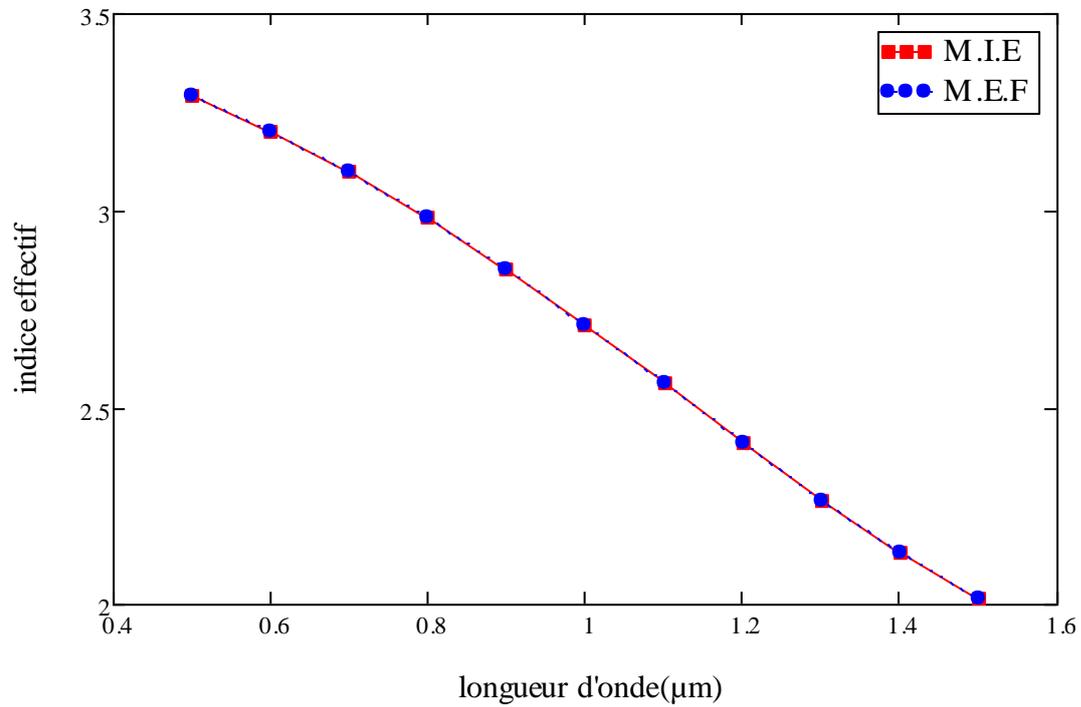


Figure 2.27 : Variation de l'indice effectif en fonction de la longueur d'onde.

2. Le facteur de confinement en fonction des paramètres géométriques de la structure :

Les figures «2.28 », « 2.29 » et « 2.30 » représentent les variations du facteur de confinement en fonction de l'épaisseur, de l'indice de réfraction de la couche guidante et de la longueur d'onde. Le facteur de confinement croit lorsque l'épaisseur de la couche guidante augmente après il atteint son maximum pour $d=0.4\mu m$ et croit aussi lorsque l'indice de réfraction de la couche guidante augmente et finalement il décroît lorsque la longueur d'onde augmente.

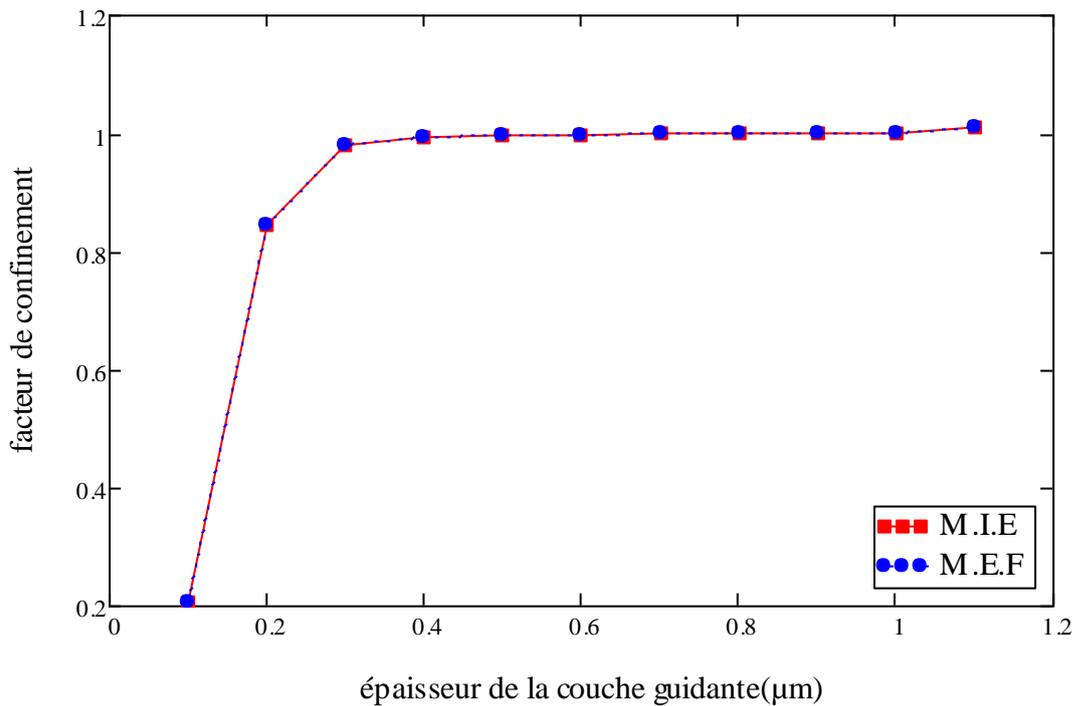


Figure 2.28: Variation du facteur de confinement en fonction de l'épaisseur de la couche guidante.

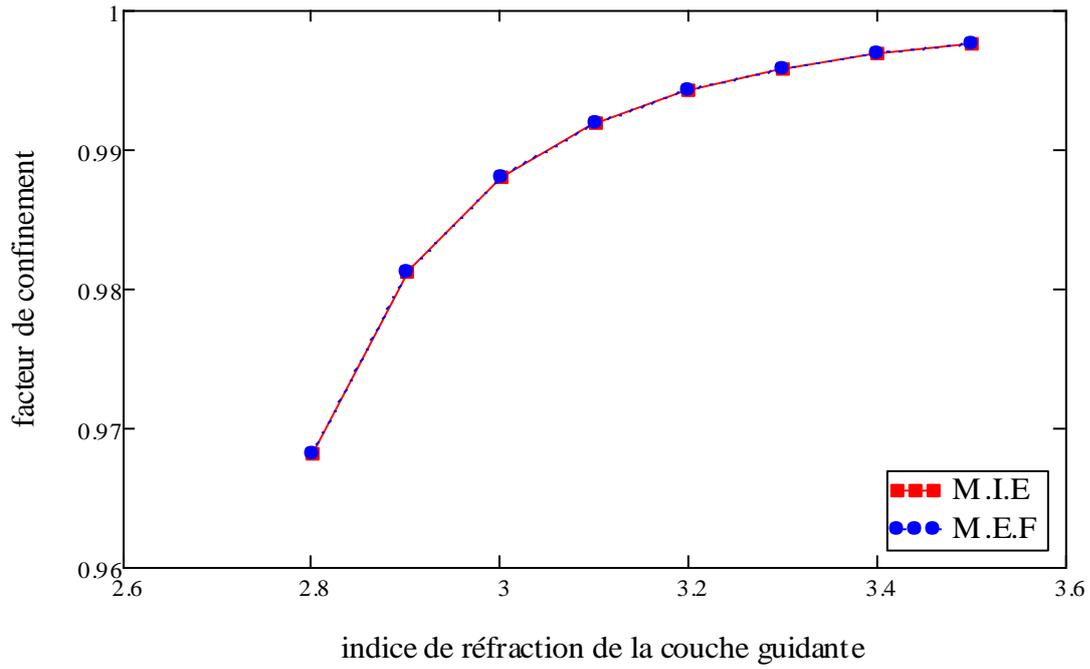


Figure 2.29 : Variation du facteur de confinement en fonction de l'indice de réfraction de la couche guidante.

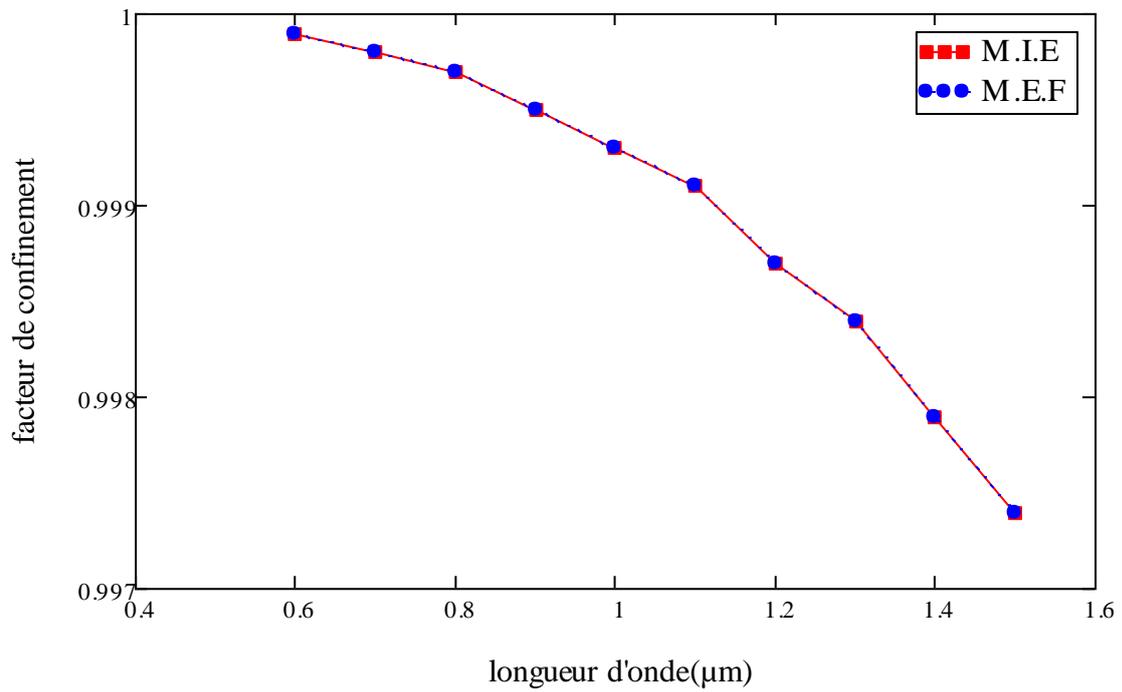


Figure 2.30: Variation du facteur de confinement en fonction de la longueur d'onde.

2.5.4 Interprétations des résultats :

D'après les résultats obtenus dans la simulation on remarque que l'indice effectif et le coefficient de confinement sont plus grands dans le mode TE par rapport au mode TM, donc le guide de lumière est plus performant dans le mode TE.

2.6 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons fait une étude d'un guide de lumière plan à trois couches symétrique et non-symétrique afin de déterminer leurs paramètres (le facteur de confinement et l'indice effectif) en fonction de la géométrie de la structure et analyser leur influence sur le guide.

A partir des résultats de simulation, on peut faire les conclusions suivantes :

- L'épaisseur, l'indice de réfraction de la couche guidante ainsi que la longueur d'onde jouent un rôle très important dans la détermination des caractéristiques des guides.
- Les modes TE présentent des caractéristiques meilleures.
- Les méthodes présentent des résultats très concordants.

3.1 Introduction :

Dans un guide de lumière conventionnel, le guidage de la lumière est assuré par une région de fort indice de réfraction (cœur) entourée par une région de faible indice.

Le mécanisme utilisé dans ces composants est la réflexion interne totale (TIR). Ces dernières années, un certain nombre de structures ont été proposées pour guider la lumière dans des milieux de faible indice telles que : les guides ARROW [17], les guides BRW [18] et les guides Slot [19].

La structure Slot a attiré une grande attention depuis sa découverte en 2004 [19] et ceci à cause de sa capacité de confiner la lumière dans une région de faible indice. Le guide Slot est basé sur une région de faible indice et de faible épaisseur (Slot rempli d'air ou de (SiO_2)) entourée par deux régions de fort indice (Si). Dans de telles structures, le champ électrique dans la région de faible indice est important comparé à celui dans les régions à fort indice, à cause de la discontinuité de ce dernier aux interfaces à fort contraste d'indices. Plusieurs composants utilisant les guides Slot ont été proposés tels que : les coupleurs directionnels [20], les portes logiques optique [21], les résonateurs avec un grand facteur de qualité [22], les modulateurs optiques [23] et les capteurs optiques [24].

Plusieurs méthodes ont été utilisées pour étudier les caractéristiques des guides slot telles que : la méthode des éléments finis [25], la méthode des différences finies [26] et la méthode BPM [27].

Dans ce travail, l'influence des paramètres géométriques sur les caractéristiques des guides Slot est étudiée en utilisant la méthode de l'indice effectif, qui est moins précise mais plus rapide et simple à implémenter que les autres méthodes, et la méthode des éléments finis qui est très précise.

3.2 Géométrie du guide Slot :

Le guide Slot est représenté sur la « Figure 3.1 ». Les indices de réfraction des régions à fort indice et à faible indice ont pour valeurs respectives : $n_H = 3,5$ (Si) et : $n_s = 1,45$ (SiO_2). La structure est recouverte par du SiO_2 ($n_c = 1,45$). h est la hauteur du guide, W_H est la largeur des régions en silicium et W_s est la largeur du Slot.

La longueur d'onde de fonctionnement est prise égale à $1,55\mu m$.

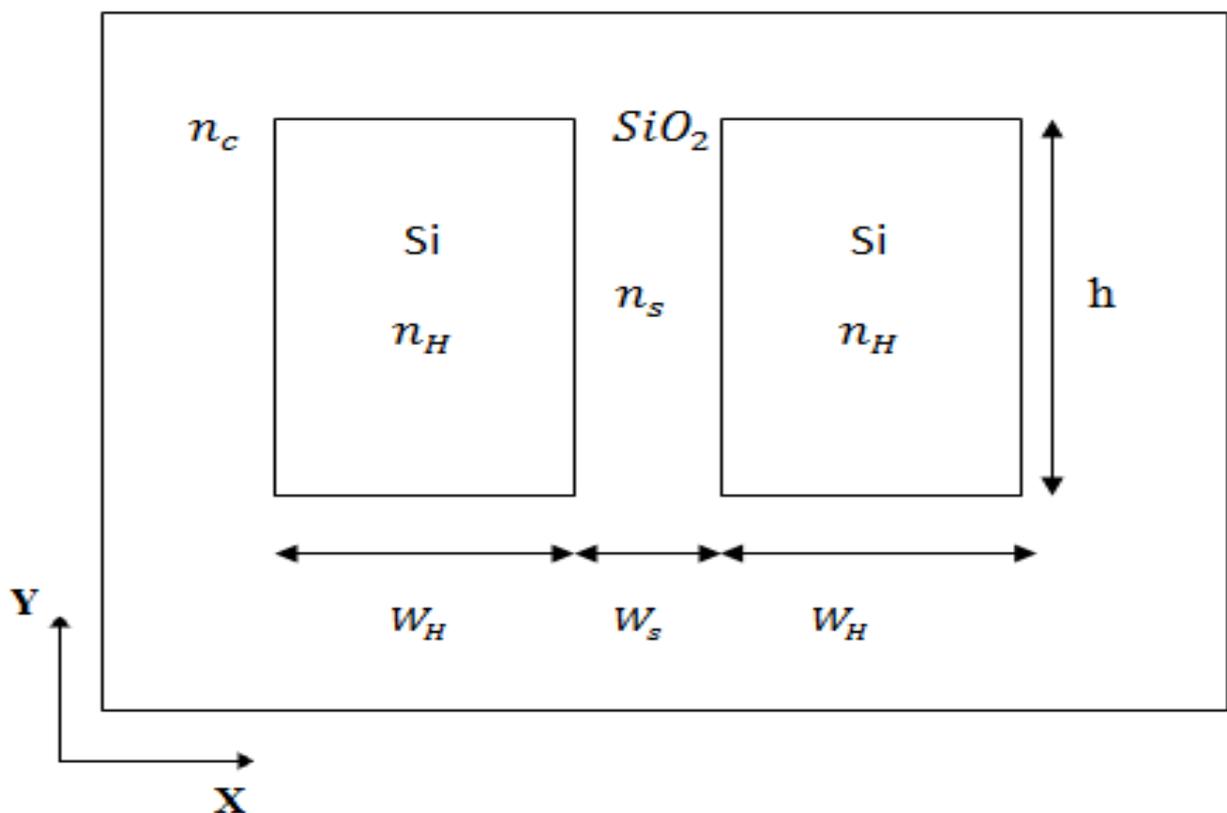


Figure 3.1 : Géométrie du guide Slot.

3.3 Théorie du modèle :

La méthode de l'indice effectif est une méthode approximative qui consiste à diviser un guide à deux dimensions en deux guides à une dimension plus simple à traiter (figure.3.2)

La première étape consiste à considérer un guide plan à cinq couches dans la direction x dont on calcule l'indice effectif n_e , ensuite on considère un guide plan à trois couches dans la direction y pour calculer l'indice effectif de la structure n_{eff} .

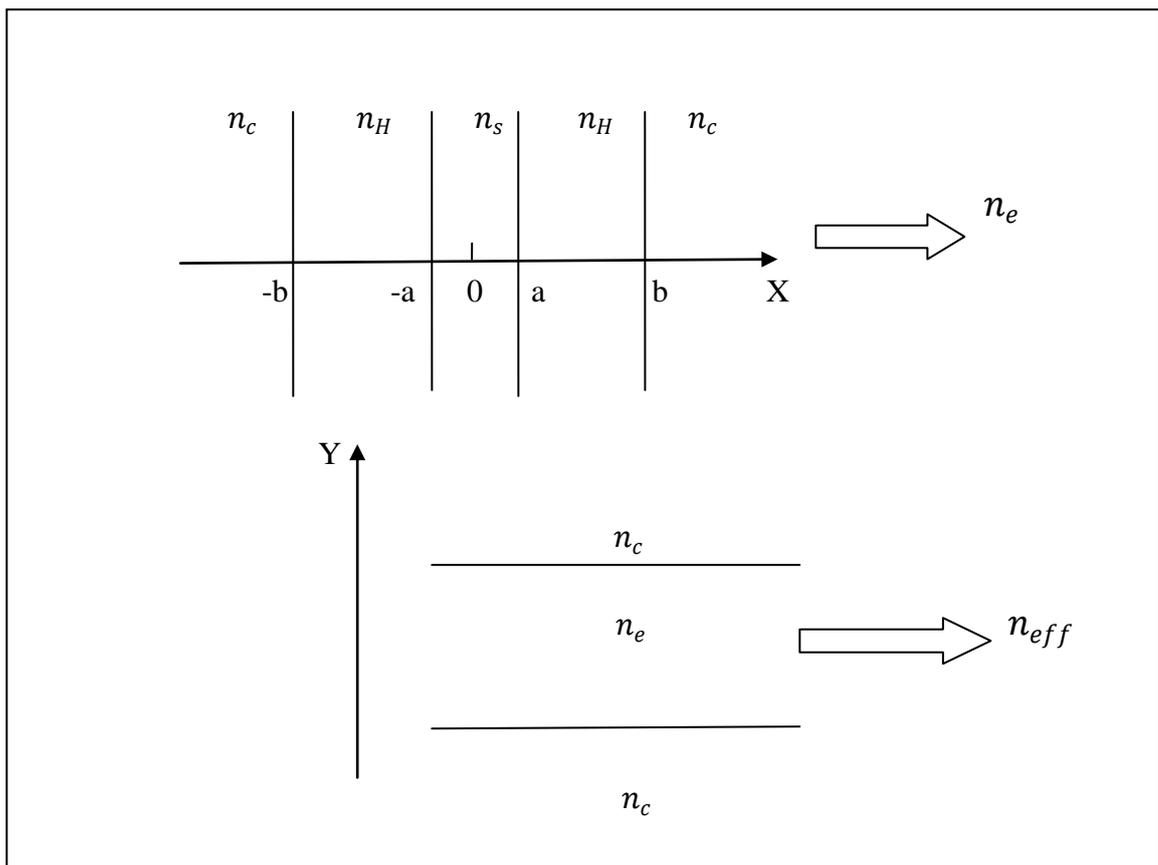


Figure.3.2 : Schéma de principe de la méthode de l'indice effectif.

L'expression du champ magnétique H_y du guide plan à cinq couche est donnée par :

$$H_y(x) = \begin{cases} A_1 \exp[-k_c(|x| - b)] & |x| > b \\ A_2 \cos[k_H(|x| - a)] + B_2 \sin[k_H(|x| - a)] & a < |x| < b \\ A_3 \exp(k_s x) + B_3 \exp(-k_s x) & |x| < a \end{cases} \quad (3.1)$$

Avec : $W_s = 2a$ et $W_H = b - a$

$$k_c = k_0 \sqrt{(n_e^2 - n_c^2)}$$

Avec :

$$k_s = k_0 \sqrt{(n_e^2 - n_s^2)}$$

$$K_H = k_0 \sqrt{(n_H^2 - n_e^2)}$$

$k_0 = \frac{2\pi}{\lambda}$ est le vecteur d'onde dans le vide et n_e est l'indice effectif dans la direction x.

n_e et les constantes A_i, B_i sont calculés à partir de l'équation aux valeurs propres obtenue par la continuité de H_y et $\frac{1}{n^2} \frac{\partial H_y}{\partial x}$ aux interfaces.

$$K_H W_H - a \tan \left[\frac{k_c n_H^2}{K_H n_c^2} \right] - a \tan \left[\frac{k_s n_H^2}{K_H n_s^2} \tanh \left(k_s \frac{W_s}{2} \right) \right] - M\pi = 0 \quad (3.2)$$

M est l'ordre du mode dans la direction x.

L'équation aux valeurs propres d'un guide plan à trois couches en mode TE est donnée par :

$$K'_H \cdot h - 2a \tan \left[\frac{k'_c}{K'_H} \right] - N\pi = 0 \quad (3.3)$$

Où

$$k'_c = k_0 \sqrt{n_{eff}^2 - n_c^2}$$

$$K'_H = k_0 \sqrt{n_e^2 - n_{eff}^2}$$

N : L'ordre du mode dans la direction y.

n_{eff} : L'indice effectif de la structure.

3.4. Résultats et discussion de simulation :

3.4.1 Etude d'un guide de lumière Slot :

La figure.3.3 montre le profil du champ électrique E_x du mode fondamental TE. On peut voir le haut confinement dans la région du slot du à la discontinuité de l'indice de réfraction aux interfaces.

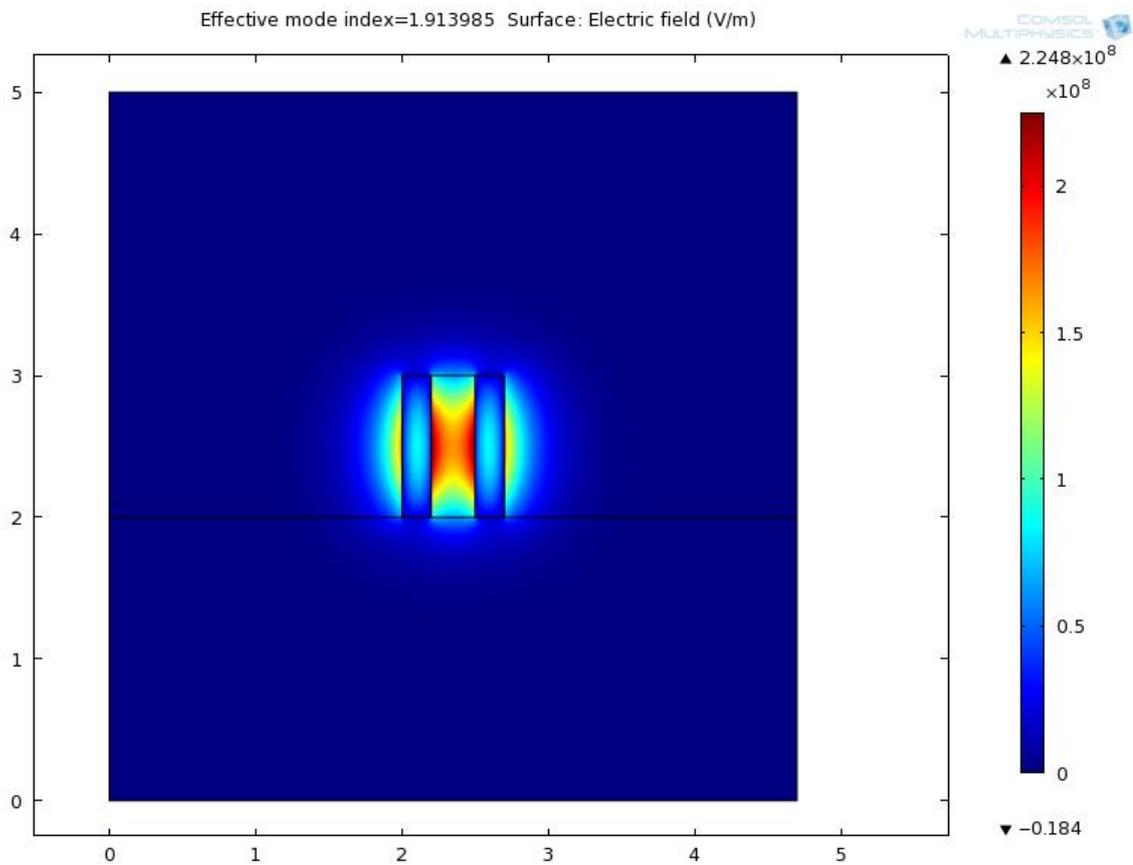


Figure 3.3 : Profil du champ électrique E_x du mode TE ($W_H = 0,2\mu m, W_S = 0,3\mu m$) suivant x.

a. L'indice effectif :

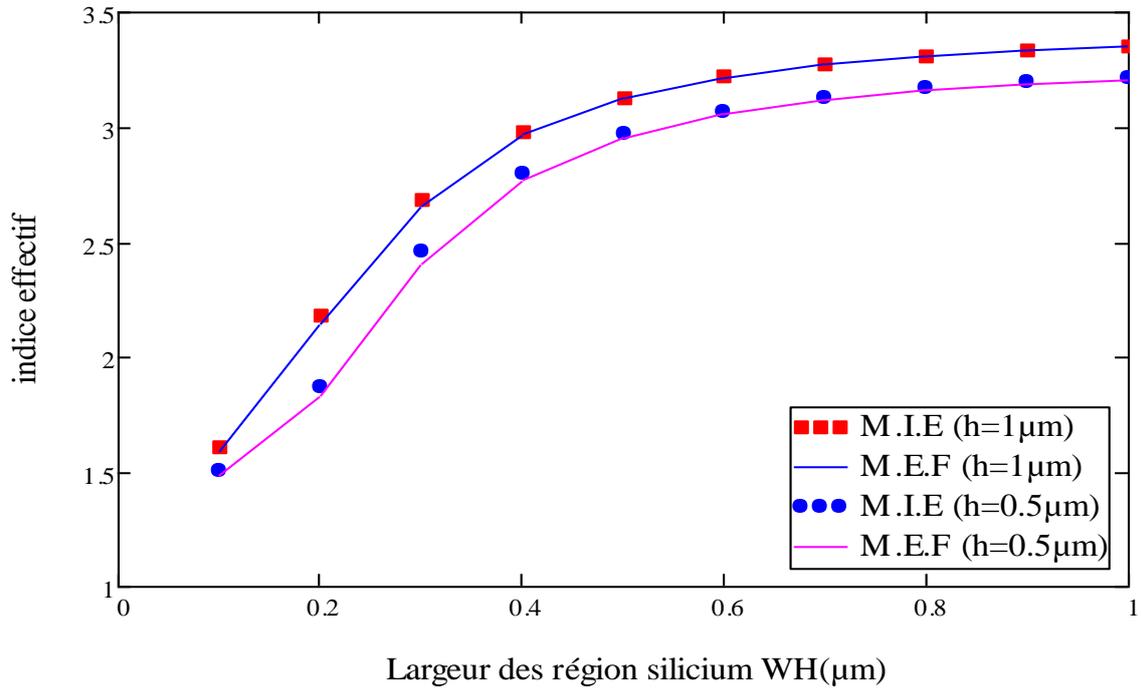


Figure 3.4 : Variation de l'indice effectif en fonction de la largeur des régions silicium pour différentes hauteurs ($W_s = 0,2 \mu\text{m}$)

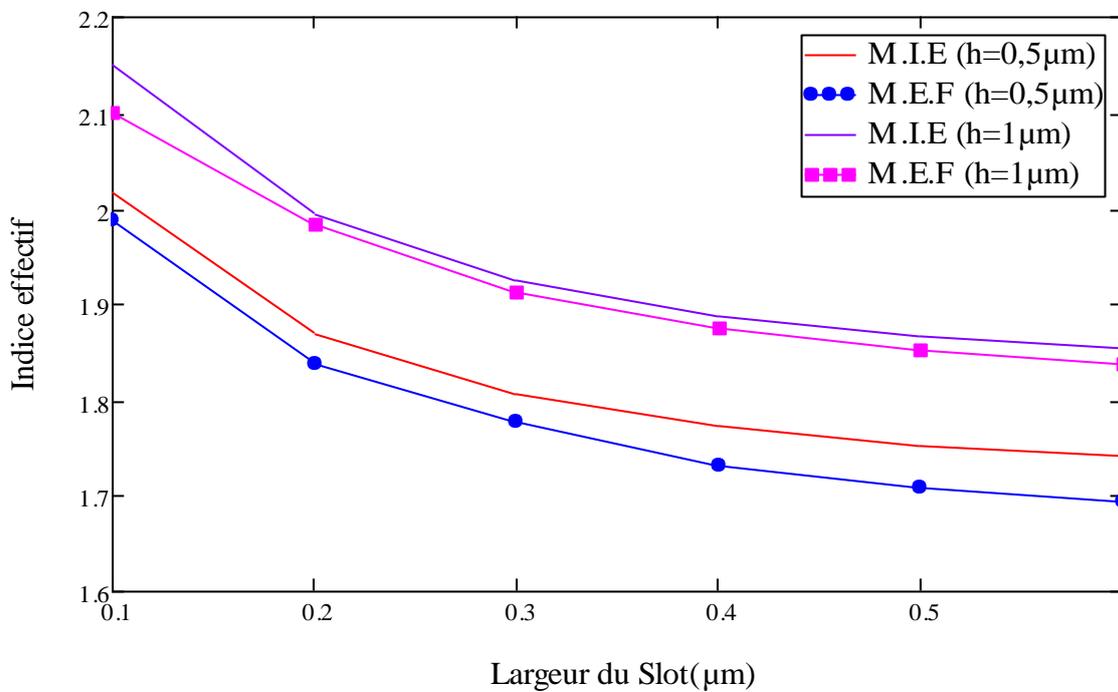


Figure.3.5: Variation de l'indice effectif en fonction de la largeur du Slot pour différentes hauteurs ($W_H = 0,2 \mu\text{m}$)

Les figures « 3.4 », « 3.5 » représentent les variations de l'indice effectif en fonction des largeurs des zones silicium W_H et du slot W_S pour différentes hauteurs h . L'indice effectif croit lorsque la largeur W_H et la hauteur h des régions à fort indice augmente et décroît lorsque la largeur du slot à faible indice W_S augmente.

b. Le facteur de confinement :

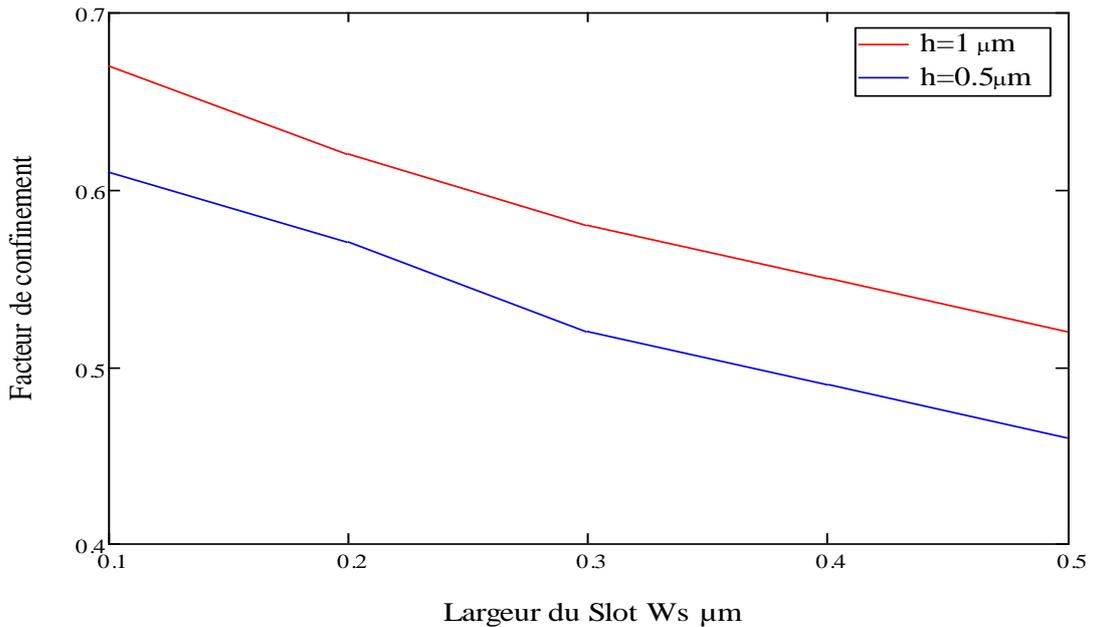


Figure 3.6: Variation du facteur de confinement en fonction de la largeur du Slot pour différentes hauteurs ($W_H = 0,2 \mu\text{m}$)

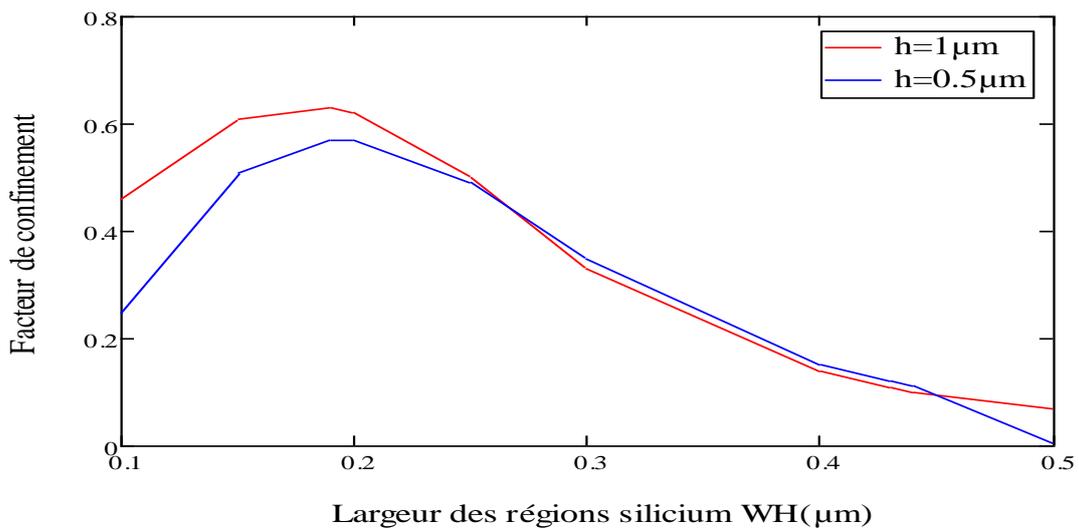


Figure 3.7 : variation du facteur de confinement en fonction de la largeur des régions silicium pour différentes hauteurs ($W_s = 0,2 \mu\text{m}$)

La figure « 3.6 » illustre la variation du facteur de confinement en fonction de la largeur du slot pour différentes hauteurs. On remarque que le facteur de confinement décroît lorsque W_s augmente.

La figure « 3.7 » montre la variation du facteur de confinement en fonction de la largeur des régions silicium W_H pour différentes hauteurs h . On constate que, pour une hauteur donnée, le facteur de confinement est maximum pour une valeur optimal de $W_H = 0,2\mu m$.

3.5 Conclusion

Dans ce chapitre, les caractéristiques du guide slot (indice effectif et facteur de confinement) ont été analysées en utilisant la méthode de l'indice effectif et la méthode des éléments finis.

L'influence des paramètres géométriques (largeur du slot, hauteur et largeur des régions silicium) sur les caractéristiques du guide a été étudiée. Les résultats montrent que les paramètres géométriques du guide jouent un rôle très important dans l'optimisation du facteur de confinement.

Comparée à la méthode des éléments finis, la méthode de l'indice effectif, bien qu'elle est moins précise, présente des résultats satisfaisants.

Conclusion générale

Le travail effectué dans le cadre de ce projet de fin d'études porte sur l'étude et la simulation d'un guide de lumière plan à trois couches (non symétrique et symétrique) ensuite d'un guide de lumière Slot. A partir des différentes relations théoriques et des simulations faites sous les logiciels Mathcad et Comsol nous avons étudié l'influence des paramètres géométriques sur les caractéristiques des guides de lumière.

Le but de notre travail est de parvenir à une méthodologie qui nous permet de déterminer les différentes caractéristiques du guide comme : l'indice effectif et le facteur de confinement qui jouent un rôle très important pour une bonne performance du guide.

Pour cela, nous avons commencé par présenter dans le premier chapitre des généralités sur la théorie électromagnétique et les équations de Maxwell, ainsi que des généralités sur les guides de lumière.

Dans le deuxième chapitre on a utilisé les équations des valeurs propres pour calculer l'indice effectif et le facteur de confinement d'un guide de lumière à trois couches ensuite le simuler.

Enfin, dans le troisième chapitre, nous avons utilisé la méthode de l'indice effectif et la méthode des éléments finis pour étudier l'influence des paramètres géométriques sur les caractéristiques du guide Slot.

D'après les résultats obtenus dans toute cette étude, nous pouvons faire les conclusions suivantes :

- Dans la méthode de l'indice effectif la difficulté se pose dans l'estimation de la valeur initiale de l'indice effectif et elle est moins précise mais plus rapide et simple à implémenter.
- La méthode des différences finies a une très bonne précision.
- Les résultats montrent que les paramètres géométriques du guide jouent un rôle très important dans l'optimisation du facteur de confinement.

- pour les modes TE le guide de lumière est plus performant que pour les modes TM.

Cette étude peut servir de base pour l'étude de structures plus complexes telles que : les coupleurs, les interconnexions optiques, les multiplexeur, les capteurs optiques...etc.

Bibliographie

- [1] M.AALONSO ? E.J, Physique Générale, « Champs et ondes »,2ème édition, 1986.
- [2] J.P.PEREZ.OPTIQUE « Fondement et Application », 1996.
- [3] Encyclopédie Universalis. Edition 2000.
- [4] M. Hulin, J.P.Maury « Les bases de l'électromagnétisme », 1991.
- [5] E. ARGENCE, Th. KAHAN« Théorie des guides et cavités électromagnétiques », 1963.
- [6] KENJI KAWANO, TSUTOMU KITOH « Introduction to Optical Waveguide Anlysis »,2001.
- [7] L'encyclopédie libre WIKIPEDIA.
- [8] F. Meriche, « Structuration 1D et 2D de matériaux diélectriques par ablation laser nanoseconde : Applications aux couches minces et monocristaux de LiNbO 3 et couches minces de TiO2»Thèse de doctorat, Université de Constantine, 2008.
- [9] F. Rebib. « Etude structurale, optique et électrique de couches minces d'oxynitride de silicium déposées par pulvérisation cathodique radiofréquence réactive »Thèse de Doctorat, 2006.
- [10] Jia-Ming Liu « A significant portion of the materials follow ,Photonic Devices,», Chapter 2 ».
- [11] D. Grenier, " Electromagnétique et transmission des ondes " Département de génie électrique et de génie informatique, Université de Laval, Québec, 2012.

[12] F. Choueikani, " *Structuration 1D et 2D de matériaux diélectriques par ablation laser nanoseconde : Applications aux couches minces et monocristaux de LiNbO3 et couches minces de TiO2* ", Thèse de doctorat, université de Saint-Etienne, 2008.

[13] RSoft CAD 5.1.9, " *User guide* " RSoft Design Group, 200 Executive Blvd. Ossining, NY 10562.

[14] H. Fujiwara, " *Spectroscopic Ellipsometry* " Japanese Edition, Copyright 2003, ISBN 4 621072536, pp. 177-181.

[15] Virginie Moreau « Etude du confinement optique dans les lasers _a cascade quantique et applications a la detection. Atomic Physics. Universite Paris Sud - Paris XI, 2008.

[16] R-M. de Ridder, K. Worhoff, A. Driessen, " *Silicon Oxynitride Planar Waveguiding Structures for Application in Optical Communication* ", *IEEE journal of selected topics in quantum electronics*, vol. 4, no. 6, pp. 930-937, November/December, 1998

[17] R. Bernini, S.Campopiano, L.Zeni, P, M. Sarro, *Sensors and Actuators B* 100 (2004) 134.

[18] A.S Helmy, *Opt, Express* 14 (2006) 1243.

[19] V.R. Almeida, Q .Xu, and M. Lipson et .AL, *Opt.Lett.* 29 (2004) 1209.

[20] T.Fujisawa et al, *Opt.Lett.* 1(2006) 56.

[21] T.Fujisawa et al, *J.Opt.Soc.Am.B* (2006) 684.

[22] T.Baehr-Jones et al, *Appl.phys. Lett* .86 (2006) 081101.

[23] V.M.N. Passaro, F. Dell'Olio, C.Ciminelli, and M.N. Armenise, *Sensors* 9 (2009) 1012.

[24] P. Mullner et al, *IEEE Photon.Technol.Lett.*24 (2006) 2557.

[25] R. sun, P.Dong, N.Feng, C.Hong, J.Michel, M.Lpson, and L. Kimerling, *optics Experess* 15 (2007) 17967.

[26] M-a.Komatsu, K. Saitoh, and M.Koshiba, *Optics Express*17 (2009) 19225.

[27] Y.Liu, X-J.Xu, S-W.Chen, and J-Z.Yu, *Chin. Phys.Lett.*25(2008) 2918.

Créé avec