

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR  
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE MENTOURI CONSTANTINE**

**FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIEUR  
DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE**

**N° D'ordre :  
Série :**

***MEMOIRE***

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de MAGISTER  
En **ELECTRONIQUE**

***OPTION : MICROSYSTEME ET INSTRUMENTATION***

*Présenté PAR :*

**Lounis Ahmed**

***Thème***

**ETUDE DU COUPLAGE GUIDE D'ONDES /FIBRE OPTIQUE  
À L'AIDE DU SIMULATEUR "FIMMPROP"**

Soutenu e février 2005

**DEVANT LE JURY:**

|                     |                 |       |                   |
|---------------------|-----------------|-------|-------------------|
| <u>Président:</u>   | Mme F.HOBAR     | Prof. | Univ. Constantine |
| <u>Rapporteur :</u> | Mme T. BOUMAZA  | Prof. | Univ. Constantine |
| <u>Examineurs</u>   | Mme S.REBIAÏ    | M.C.  | Univ. Constantine |
|                     | Mr M. BOUCHEMAT | Prof. | Univ. Constantine |

# *REMERCIEMENTS*

Mes remerciements vont tout particulièrement à mon encadreur Mme **T. Boumaza**, professeur à l'université de Constantine qui a assuré la bonne démarche de cette thèse, qu'elle trouve ici l'expression de mon profond respect, pour les conseils prodigués lors de la rédaction de ce manuscrit.

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements à Madame le Professeur **F. Hobar** qui me fait l'honneur de présider le Jury de cette thèse.

Je remercie vivement Madame **S.Rebiaï**, Maître de Conférence à l'université de Constantine qui a accepté aimablement de participer au jury et de l'intérêt qu'elle porte à ce travail.

Je remercie vivement Monsieur **M.Bouchemat**, Professeur à l'université de Constantine pour son aide précieuse et sa disponibilité à tout moment et qui me fait l'honneur de juger ce travail.

Je remercie sincèrement M<sup>elle</sup> **F.Fares** qui m'a fait bénéficier de sa générosité et de son soutien à tout moment.

Enfin je remercie toute personne ayant de près ou de loin contribué à l'élaboration de ce modeste travail et à l'ensemble des enseignants qui ont assuré notre formation durant toute ces années d'étude.

# **SOMMAIRE**

|                     |          |
|---------------------|----------|
| <b>Introduction</b> | <b>1</b> |
|---------------------|----------|

## **Chapitre I : Bases théorique du guidage de la lumière**

|   |    |
|---|----|
| I-1 Introduction.   | 3  |
| I-2 La réflexion totale   | 3  |
| I-3 Notion du guidage de la lumière.  | 4  |
| I-4 Les différents types des guides d'ondes                                 | 5  |
| I-4-1 Les guides d'ondes optiques planars                                   | 5  |
| I-4-1-1 Notion de mode  | 6  |
| I-4-1-2 Matériaux pour l'optique guidée                                     | 9  |
| a-Les diélectriques   | 9  |
| b-Les semi-conducteurs (SOI)  | 10 |
| I-4-1-3 Procédés de fabrication du SOI                                      | 11 |
| I-4-2 Les guides bidirectionnels  | 14 |
| I-4-2-1 Influence de la géométrie sur les modes guidés                      | 15 |
| I-4-2-1-1 Guide d'onde monomode   | 15 |
| I-4-2-1-2 Insensibilité à la polarisation                                   | 16 |
| a- Différentes polarisations d'une onde électromagnétique                   | 16 |
| b- Notion d'indice effectif et d'indice de groupe                           | 17 |
| c- Biréfringence d'indice effectif et d'indice de groupe                    | 17 |
| I-4-3 Les fibres optiques   | 18 |
| I-4-3 -1 Généralités  | 18 |
| I-4-3 -2 Différents types de fibres   | 18 |
| a- Fibre optique multimode à saut d'indice                                  | 19 |
| b- Fibre à gradient d'indice  | 19 |
| c- Fibre monomode   | 19 |
| I-4-3-3 Matériau pour les fibres optiques                                   | 20 |
| I-4-3-4 Dispersion intermodale (fibres optiques multimodes à saut d'indice) | 21 |
| I-4-3-5 Modes guidés des fibres optiques monomodes                          | 22 |

## **Chapitre II : Principe du couplage et présentation générale de l'outil de**

### **simulation «FIMMPROP»**

|  |    |
|--|----|
| II-1 Introduction  | 24 |
| II-2 Les différents types de couplage                          | 24 |
| II-2-1 Couplage de la lumière par prisme                       | 24 |
| II-2-2 Couplage de la lumière par réseau de diffraction        | 25 |
| II-2-3 Couplage de la lumière en bout                          | 26 |
| a-les transitions  | 27 |
| II-3 Le simulateur" FIMMPROP"                                  | 28 |
| II-4 Présentation générale de l'outil de simulation" FIMMPROP" | 29 |

|  |    |
|--|----|
| II-4-1 Conception de la transition   | 29 |
| II-4-1-1 Construction du guide d'onde d'entrée et de sortie dans "FIMMWAVE".                   | 31 |
| II-4-1-2- Coupe transversale du guide d'onde d'entrée et de sortie dans "                      |    |
| FIMMPROP "   | 31 |
| II-4-1-3 Fonction d'interpolation  | 32 |
| II-5 Le choix des paramètres d'optimisation  | 33 |
| II-5-1 Intégrale de recouvrement des modes   | 33 |
| II-5-2 L'ordre d'intégration   | 33 |
| II-5-3-Panneau des paramètres du solutionneur (indice effectif)                                | 34 |
| II-5-4 Injection de la lumière   | 35 |
| II-6 Méthode de discrétisation   | 36 |
| II-6-1 Les matrices de dispersion (Scattering matrix) et méthode de calcul                     | 39 |
| II-7 Visualisation du profil du champ à la sortie de la transition                             | 40 |
| II-8 La méthode de l'indice effectif   | 41 |
| <b><u>Chapitre III</u> :       Simulation des transitions et interprétations des résultats</b> |    |
| III-1 Introduction   | 42 |
| III -2 La transition latérale  | 42 |
| III -2-1 Géométrie de la transition  | 42 |
| III -2-2 Caractéristiques de la fibre optique  | 43 |
| III -2-3 Caractéristiques du guide d'onde rib  | 43 |
| III-2-4 Résultats de simulation et interprétation  | 44 |
| a) Profil de l'intensité à l'entrée du guide   | 44 |
| b) Profil de l'intensité à la sortie du guide  | 44 |
| Optimisation des différentes longueurs de la transition  | 44 |
| III -3 Transition verticale  | 46 |
| III -3-1 Géométrie de la transition  | 46 |
| III -3-2 Caractéristiques de la fibre optique  | 47 |
| III -3-3 Caractéristiques du guide d'onde plan   | 47 |
| III -3-4 Résultats de simulation et interprétations  | 48 |
| III -3-4-1 Optimisation de l'épaisseur de la couche active                                     | 48 |
| III -3-4-2 Optimisation de l'épaisseur de la couche enterrée                                   | 50 |
| III -3-4- 3 Optimisation des différentes longueurs de la transition                            | 51 |
| III-4 Validation des résultats   | 56 |
| Conclusion   | 59 |
| Références bibliographiques  | 60 |
| Résumé   |    |

# *Introduction*

Le couplage de la lumière d'une fibre optique vers un guide d'onde submicronique ou guide-fibre demeure un véritable obstacle technologique. Les performances d'un réseau optique dépendent en grande partie de la qualité d'interfaçage entre les nombreuses connexions fibres optiques/composants optoélectroniques. En d'autre terme les techniques de couplage d'une fibre optique avec les dispositifs doivent être fiables et efficaces pour de bons rendement et des coûts réduits. Par contre, les grandes tailles des modes des fibres optiques (environ  $10\mu\text{m}$ ), dûes à la faible différence d'indice entre son cœur et sa gaine de l'ordre de  $2.10^{-2}$ , engendrent de faible rendement de couplage avec la plus part des composants optoélectroniques.

Par conséquent il existe une méthode qui consiste à intégrer au composant un adaptateur de mode, ce dernier est un élément qui permet de passer d'un guide à un autre. Dans notre cas d'un guide large (fibre optique monomode de diamètre  $8\mu\text{m}$ ) à un guide de section beaucoup plus faible (guide plan ou guide en arête) où la section transversale change le long de la direction de propagation  $z$ . [1]

C'est dans ce contexte que s'inscrit notre travail qui consiste à optimiser les performances d'un composant optoélectronique : c'est un guide d'ondes silicium sur isolant (SOI) type SIMOX. Nous étudions le couplage fibre/guide, pour cela nous implantons ce modèle dans le simulateur "FIMMPROP". Ceci nécessite la maîtrise des fonctions de base du logiciel "FIMMWAVE", tels que les noeuds du guide d'ondes, les solutionneurs de mode, le trouveur des modes,...etc. Le programme de calcul est capable de donner la résolution des équations d'ondes de Maxwell, tenant compte de toutes les réflexions aux joints à l'interface des différents composants. La facilité d'utilisation de ce logiciel et la vitesse de calcul font de FIMMPROP l'outil idéal pour concevoir notre dispositif à section conique. [2]

- Nous présentons donc dans le premier chapitre l'étude théorique, concernant les fibres optiques, et les caractéristiques des guides plans et les guides d'ondes à confinement latéral, ainsi que les équations de base de la propagation guidée.

- Le deuxième chapitre est consacré au principe de couplage à une description générale du logiciel FIMMPROP ainsi que la méthode de discrétisation tout en explicitant la conception du dispositif proposé lors de son implantation dans le simulateur.
- Le troisième chapitre regroupe l'ensemble des résultats obtenus ainsi que leur interprétation : Nous effectuerons tout d'abord l'optimisation à l'aide du logiciel FIMMWAVE, ensuite le couplage de la lumière d'une fibre optique monomode à un guide d'onde à l'aide du logiciel "FIMMPROP". On utilisera les deux types de transition (verticale ou latérale) selon la géométrie du guide d'onde choisi (plan ou en arête).

Enfin une conclusion générale et des perspectives sont présentées à la fin de ce mémoire.

## I-1-Introduction

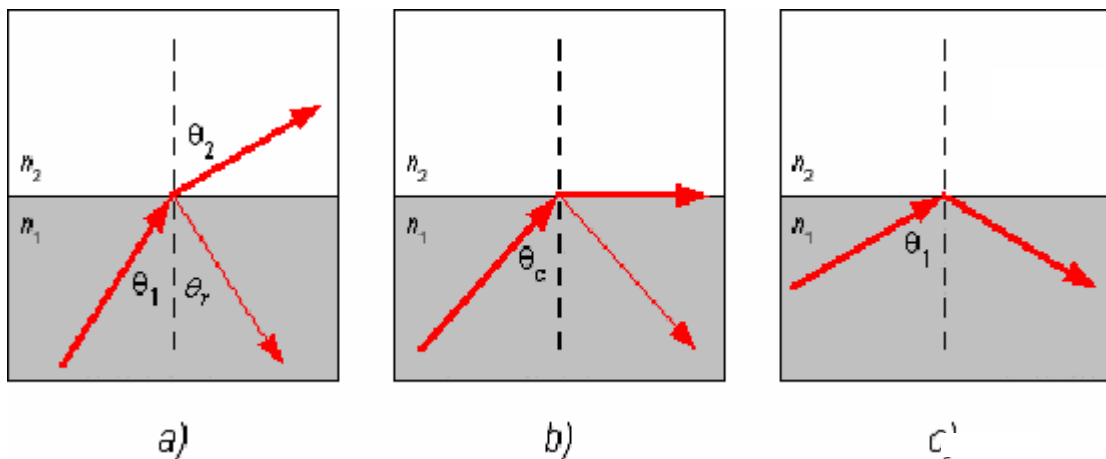
De la même manière que des dépôts métalliques sont nécessaires pour transporter un signal électrique dans une puce, il faut un dispositif optique généralement passif appelé guide d'onde pour transporter une information, sous forme de signal lumineux d'un endroit à un autre sur un circuit intégré.

Le principal phénomène optique à l'origine du guidage de la lumière est la réflexion totale aux interfaces.

## I-2 La réflexion totale

Le principe de la réflexion totale interne est à la base de la propagation des ondes lumineuses dans le guide d'onde. D'après ce principe, lorsqu'un rayon lumineux passe d'un milieu à un autre d'indice de réfraction plus faible, il peut être réfléchi. De plus, lorsque l'angle d'incidence du rayon lumineux est plus grand qu'un angle critique, la lumière est réfléchie en totalité et il n'y a aucune perte du signal (voir figure I-1).

Connaissant les indices de réfraction des deux matériaux de l'interface, l'angle critique peut facilement être calculé.



**Figure I-1 : Réfraction et réflexion d'un rayon lumineux. (a) Réfraction pour  $q_1 < q_c$ , le rayon incident est aussi partiellement réfléchi dans le premier milieu. (b) rayon critique lorsque  $q_1 = q_c$ . (c) réflexion totale interne pour  $q_1 > q_c$ .**

Physiquement, l'indice de réfraction d'un matériau est le rapport entre la vitesse de la lumière dans le vide ( $c$ ) et sa vitesse dans le matériau ( $v$ ).

$$n = \frac{c}{v}$$

Les lois de Snell-Descartes, issues des conditions de passage, imposent :

$$q_1 = q_r \quad (\text{I.1})$$

$$n_1 \sin q_1 = n_2 \sin q_2 \quad (\text{I.2})$$

La réflexion totale est définie pour  $q_2 = 90^\circ$ , on peut constater que la valeur critique  $q_c$  de  $q_1$  est :

$$q_c = \arcsin(n_2/n_1) \quad (\text{I.3})$$

La réflexion totale est donc obtenue pour  $q_c \leq q_1 \leq p/2$

### I-3 Notion du guidage de la lumière :

Un mode peut être guidé par la couche d'indice  $n_1$  (figure I-1) si la double condition de réflexion totale aux interfaces de cette couche, donnée par les relations (I.4) et (I.5), est vérifiée.

$$n_1 > n_2 \quad (\text{I.4})$$

$$\sin q \geq n_2/n_1 \quad (\text{I.5})$$

Si on note  $\beta$  la constante de propagation telle que l'onde qui se propage soit sous la forme  $Ae^{i(\omega t - \beta x)}$  avec  $\omega = 2\pi c/l$ , alors  $\beta = k_0 \cdot n_2 \cdot \sin q$  ( $q$  vérifiant (I.5)) et l'indice effectif est défini par la relation :

$$n_{eff} = \beta / k_0 = n_2 \cdot \sin q \quad (\text{I.6})$$

Où  $k_0$  est la norme du vecteur d'onde.

En terme d'indice effectif, la condition d'obtention d'un mode guidé s'écrit suivant l'inégalité suivante :

$$n_2 \leq n_{eff} \leq n_1 \quad (\text{I.7})$$

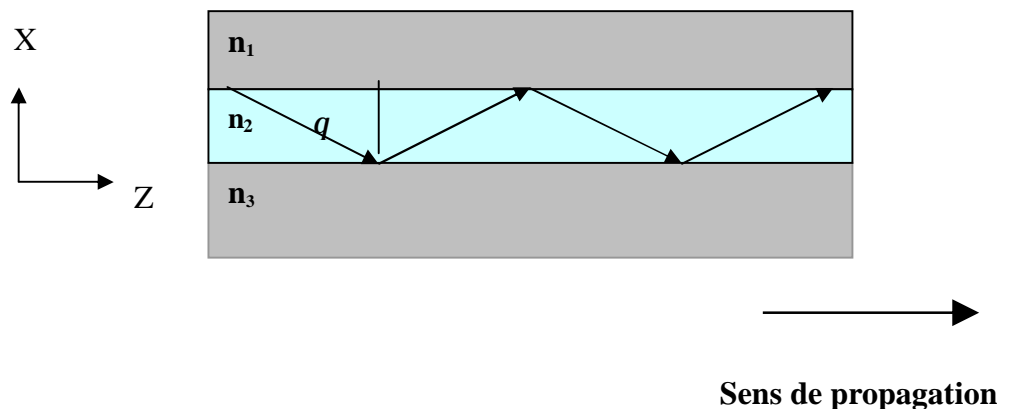


## I-4 Les différents types de guides d'ondes

### I.4.1 Les guides d'ondes optiques planars

Le guide d'onde optique est l'élément incontournable de tout système d'optique intégrée. L'idée de base est de guider la lumière dans un milieu transparent pour s'affranchir de la diffraction. Autrement dit, on recherche la possibilité de faire se propager une onde lumineuse sur une distance voulue sans qu'elle ne diverge. Dans sa fonction première d'acheminement de la lumière, le guide d'onde est un composant dit passif. [3]

La configuration la plus simple d'un guide d'onde plan est un empilement de trois couches de matériaux d'indices de réfraction différents. La lumière se propage préférentiellement dans la zone centrale d'indice  $n_2$  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  $n_1$  (figure I-2). 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. [3,4]



**Figure I-2 : Configuration de base d'un guide d'onde plan**

Le principe du guide d'onde repose sur la réflexion totale de la lumière sur les deux interfaces film-substrat et film-couverture. Il existe deux conditions nécessaires pour que le guidage optique d'une onde électromagnétique soit possible. D'abord sur les indices de réfraction : il faut obligatoirement que  $n_2$  soit supérieur à  $n_1$  et  $n_3$ . Ensuite l'injection de la lumière doit être faite dans un cône défini pour avoir une réflexion totale lors de la première réflexion du rayon lumineux sur une des deux interfaces. [5]

### I-4-1-1 Notion de mode

On appelle mode d'un guide, la solution des équations de Maxwell qui correspond à une onde qui se propage dans un guide de longueur infinie sans excitation extérieure.

Nous rappelons ci-dessous l'origine et les principales propriétés des modes des guides d'ondes diélectriques. [1]

Soit un ensemble de milieux diélectriques et non magnétiques, non absorbants, linéaires et isotropes : une couche d'indice  $n_2$  déposée sur un substrat semi infini d'indice  $n_1$  et couverte d'un superstrat semi infini d'indice  $n_3$  vérifiant les relations (figure I-2) :

$$n_2 > n_1 > n_3$$

Les équations de Maxwell dans un milieu matériel s'écrivent :

$$\text{rot } \vec{E} = \vec{\nabla} \wedge \vec{E} = - \frac{\dot{\vec{B}}}{\partial t} \quad (\text{I-8})$$

$$\text{rot } \vec{B} = \vec{\nabla} \wedge \vec{B} = m_0 \left( \vec{J} + e_0 e_r \cdot \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right) \quad (\text{I-9})$$

$$\text{div } \vec{B} = \vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (\text{I-10})$$

$$\text{div } \vec{E} = \vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{r}{e_0 e_r} \quad (\text{I-11})$$

Avec :

$e_0$  : permittivité du vide

$e_r$  : permittivité relative du milieu de propagation

$m_0$  : perméabilité du vide

$\dot{\vec{B}}$  : Champ d'induction magnétique

$\dot{\vec{E}}$  : Champ électrique

$\vec{J}$  : Densité du courant électrique

$r$  : Densité de charge électrique

On a aussi :

$$\dot{\vec{D}} = e_0 e_r \dot{\vec{E}}$$

$$\dot{\vec{B}} = m_0 m_r \dot{\vec{H}}$$

Avec :

$\dot{\vec{D}}$  : Champ d'induction électrique

$\dot{\vec{H}}$  : Champ magnétique

$m_r$  : Perméabilité relative du milieu (non magnétique :  $m_r=1$ ).

On montre que, à cause de l'invariance de la structure selon  $y$  ( $\partial/\partial y = 0$ ), l'ensemble des solutions se sépare en deux familles distinctes : les ondes TE Pour lesquelles  $E_x = E_z = H_y = 0$ , et les ondes TM, pour lesquelles  $H_x = H_z = E_y = 0$ . Pour les ondes TE dans le domaine fréquentiel, en posant une dépendance fréquentielle,  $\exp(-i\omega t)$  et parce que la structure est invariante en  $y$ , le problème se ramène alors à l'équation d'Helmholtz en  $E_y$  (en  $H_y$  pour les ondes TM).

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E_y}{\partial z^2} = -(kn_j)^2 E_y \quad j = 1,2 \text{ ou } 3 \quad (\text{I-12})$$

Où  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$  est la norme du vecteur d'onde avec  $\lambda$  la longueur d'onde dans le vide.

Les solutions sont de la forme  $\exp(+ik_{jx}x) \exp(+ik_{jz}z)$  et on les remplace dans la relation (I-12) pour obtenir :

$$k_{jx}^2 + k_{jz}^2 = (kn_j)^2 \quad j = 1,2 \text{ ou } 3 \quad (\text{I-13})$$

Les conditions aux limites imposent des composantes longitudinales du vecteur d'onde identique dans les trois milieux.

$$k_{1z} = k_{2z} = k_{3z} = b \quad (\text{I-14})$$

Où  $b$  est la constante de propagation suivant la direction  $z$ . On obtient alors  $k_{jx}$  en combinant (I-13) et (I-14)

$$k_{jx} = \frac{1}{(kn_j^2 - b^2)^{1/2}} \quad j = 1,2 \text{ ou } 3 \quad (\text{I-15})$$

On peut alors discuter en fonction de la valeur de  $b$  (figure I-3)

i.  $b$  est réel :

a. si  $|b| > kn_2$  le champ est exponentiel dans les trois milieux et croit à l'infini ; ce qui n'est pas physiquement acceptable.

b. si  $kn_2 > |b| > kn_1$ , alors  $k_{2x}$  est réel  $k_{1x}$  et  $k_{3x}$  sont imaginaires. C'est à dire que l'amplitude de la composante du champ électrique selon  $y$ ,  $E_y$  varie sinusoidalement dans le film (milieu d'indice  $n_2$ ) et exponentiellement dans le substrat et le superstrat. Les valeurs de  $b$

sont alors discrètes. La puissance lumineuse est localisée, principalement dans la couche guidante : on a un ou des modes guidés et on définit un indice effectif des modes égal à :

$$n_{eff} = \frac{b}{k} .$$

c.  $kn_1 > |b| > kn_3$  alors  $k_{1x}$  et  $k_{2x}$  sont réels et  $k_{3x}$  est imaginaire. Ici la variation de  $E_y$  est sinusoïdale dans le film et dans le substrat et exponentielle dans le superstrat.  $|b|$  prend toutes les valeurs réelles entre  $kn_1$  et  $kn_3$ , la puissance n'est pas localisée dans le film guidant on a un continuum de modes de radiation où modes de substrat.

d.  $kn_3 > |b| > 0$ ,  $k_{1x}, k_{2x}, k_{3x}$  sont réels et  $E_y$  varie sinusoïdalement dans chaque milieu.  $|b|$  prend toutes les valeurs entre  $k_0 n_3$  et 0. La puissance lumineuse n'est pas localisée, on a de nouveau un continuum de mode de radiation, les modes du superstrat et du substrat.

Les valeurs positives de  $b$  correspondent à des modes qui se propagent dans le sens des  $z$  propagatifs. Les valeurs négatives de  $b$  correspondent à des ondes qui se propagent en sens inverse.

ii.  $b$  est imaginaire pur  $b = \pm i|b|$  et toutes les valeurs de  $b$  sont possibles. On a un continuum de mode qui s'atténuent suivant  $z$ . Ces modes ne transportant pas de puissance loin du guide. On les néglige donc lorsqu'on n'a pas besoin d'une description fine du champ.

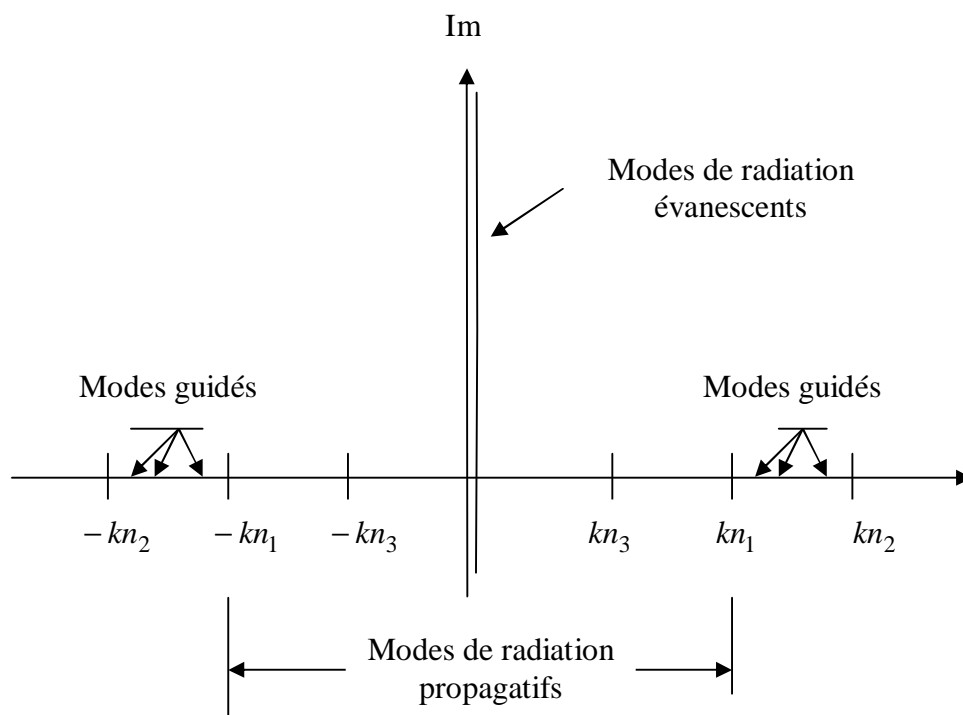


Figure I-3 : Modes d'un guide plan en fonction de la valeur de  $b$  .

### I-4-1-2 Matériaux pour l'optique guidée :

Plusieurs types de matériaux peuvent être utilisés pour l'optique guidée. Les principaux critères de sélection sont :

- 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  $\Delta n$  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  $\Delta n$ , 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  $\Delta n$  sont bien adaptés pour le couplage guide-fibre optique. Les guides à fort  $\Delta n$  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. [4]

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

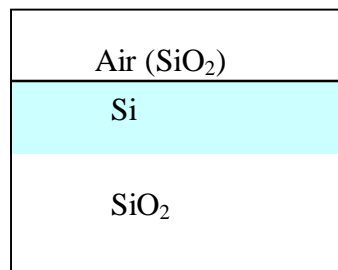
- **Les diélectriques**

Les diélectriques ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{SiO}_2$  dopée,  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) 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  $\Delta n$ . 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). [3,4]

- **Les 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.[4,6]

Une solution envisageable pour l'optique intégrée qui constitue la base des composants étudiés dans cette thèse, 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 I - 4) :



**Figure I-4 : Guide d'onde SOI**

Le film de silicium d'indice  $n_{Si}=3.47564$  à la longueur d'onde  $\lambda=1.55\mu\text{m}$ , est situé entre la couche de silice enterrée d'indice  $n_{SiO_2}=1.44404$  à la même longueur d'onde et l'air d'indice  $n_{air}=1$  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.

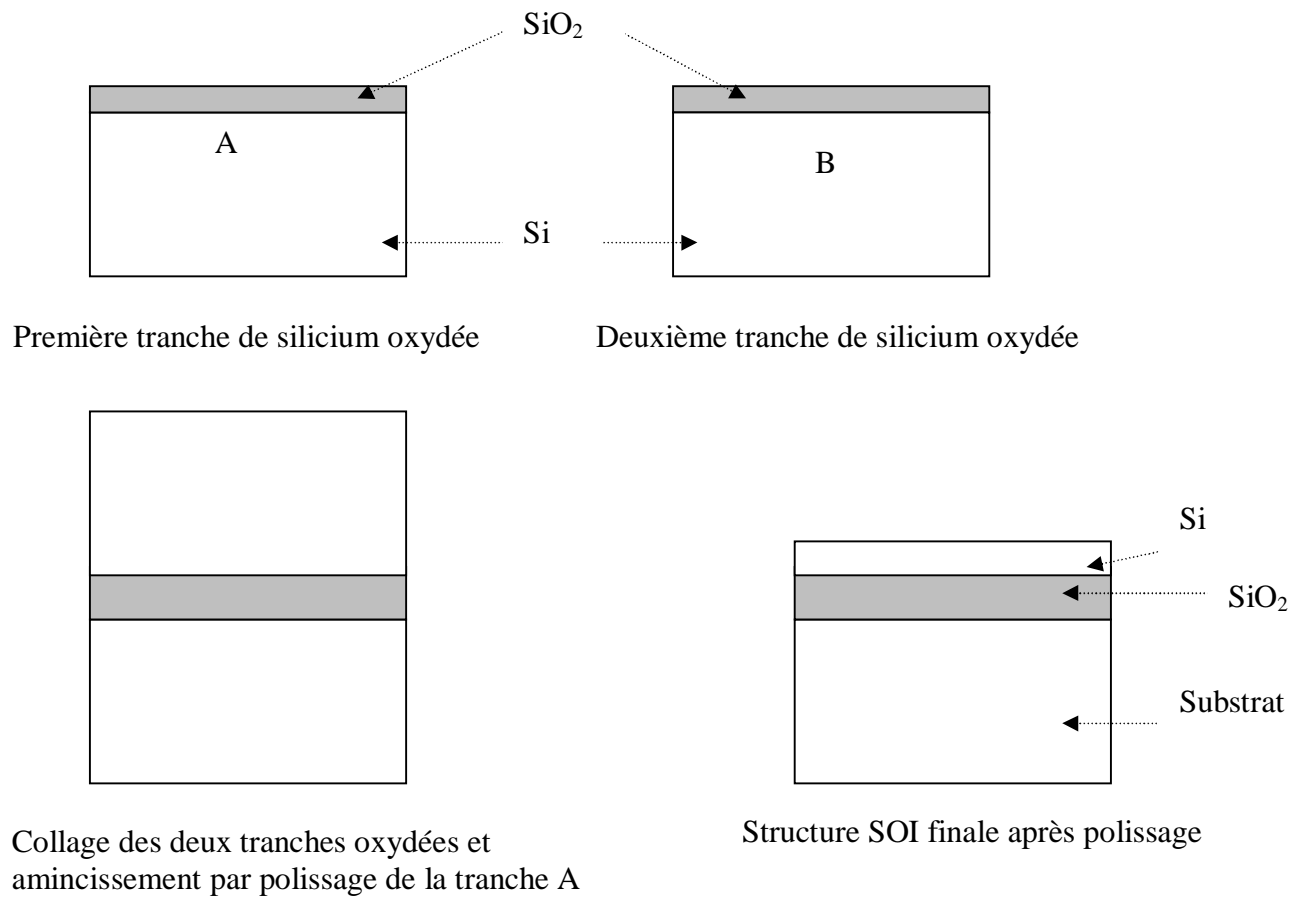
Le SOI permet donc l'intégration monolithique de fonctions électriques et optiques sur un même substrat et avec une grande densité d'intégration. La technologie SOI a ouvert la voie à la réalisation de circuits optiques intégrés sur silicium de meilleure qualité optique et de faible coût de fabrication. [6]

### I-4-1-3 Procédés de fabrication du SOI :

Nous allons décrire du point de vue technologique deux procédés récents, des plus utilisés lors de la fabrication du SOI : le BESOI et l'UNIBOND. Le premier consiste à oxyder, thermiquement, deux plaquettes de silicium qu'on colle par leurs facettes oxydées. Ensuite, on procède à un polissage de la plaquette supérieure jusqu'à une épaisseur désirée du film de silicium. On obtient alors un SOI, dont le substrat est la plaquette de silicium non polie, la silice enterrée est la couche constituée par le collage des deux silices thermiques et le film superficiel est ce qui reste du polissage de la deuxième plaquette (figure I-5). Par contre, le procédé BESOI consomme deux tranches de silicium pour en faire une seule tranche de SOI, ce qui constitue un surcoût de production non négligeable. Récemment on a pu contourner ce problème par le procédé UNIBOND (figure I-6).

Cette technique qui est développée par la société SOITEC, a de nombreux avantages. Elle est d'une grande reproductibilité, donne une très bonne qualité de l'interface Si/SiO<sub>2</sub> et une bonne uniformité des couches. La technique consiste à :

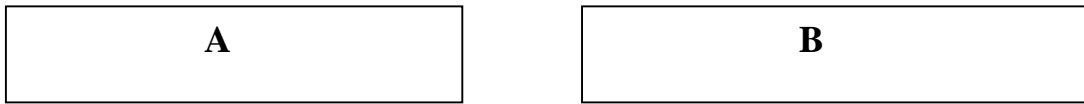
1. Utiliser deux tranches de silicium A et B.
2. Oxyder la tranche de silicium A pour créer la future couche de silice enterrée.
3. Créer, dans la tranche A une zone de fragilisation par implantation ionique d'ions H<sup>+</sup> à travers la silice à une profondeur prédéfinie.
4. Nettoyer la tranche A et lui coller la deuxième tranche de silicium B.
5. Cliver suivant la zone de fragilisation et récupérer les deux tranches de substrat.
6. Effectuer le recuit de la tranche SOI à une température d'environ 1100°C. Le reste de la tranche A est repris pour un nouveau procédé. [4, 5,7]



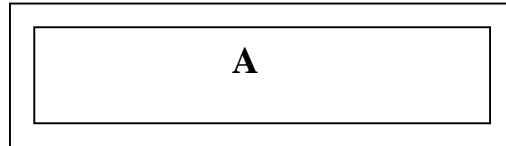
**Figure I-5 : Le procédé BESOI**



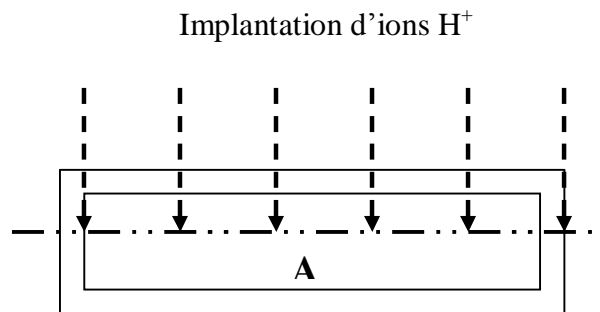
**Etape 1 :**



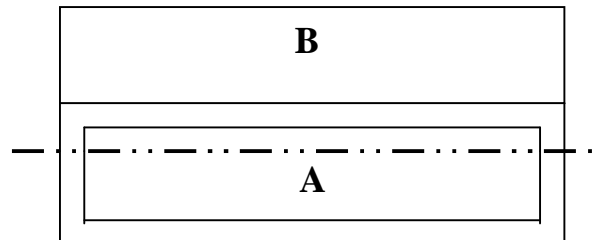
**Etape 2 :**



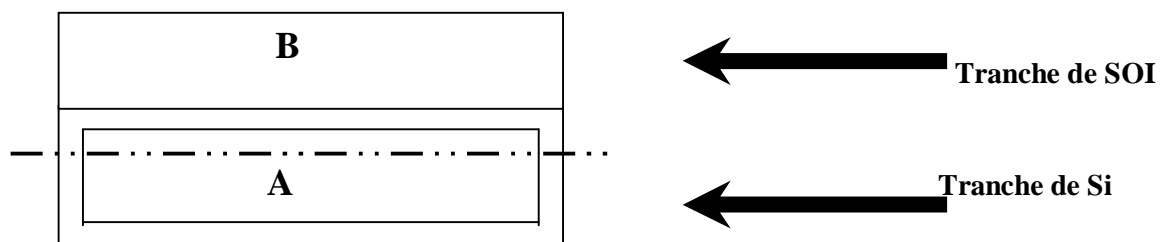
**Etape 3 :**

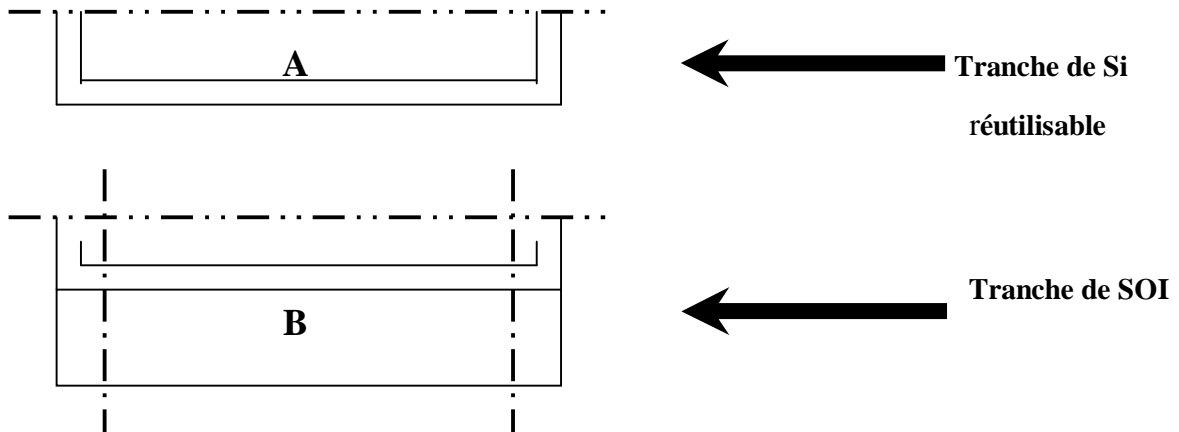


**Etape 4 :**



**Etape 5 :**



**Etape 6 :**

**Figure I-6 : Procédé de fabrication des plaques SOI par la SOITEC**

**I-4-2 Les guides bidirectionnels :**

Un guide d'onde 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 bidirectionnel. 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 bidirectionnel. Néanmoins il y a toujours deux familles de 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 peut distinguer deux types de guides bidirectionnels :

- Un guide d'onde ruban : c'est un guide de silicium (Si) enterré dans de la silice ( $SiO_2$ ). Il est obtenu par une gravure totale du film de silicium autour d'une bande définissant la dimension latérale du guide. (figure I-7 (a))
- Un guide d'onde en arête : il est obtenu par une gravure partielle du film de silicium révélant une partie du guide rectangulaire (figure I-7 (b))

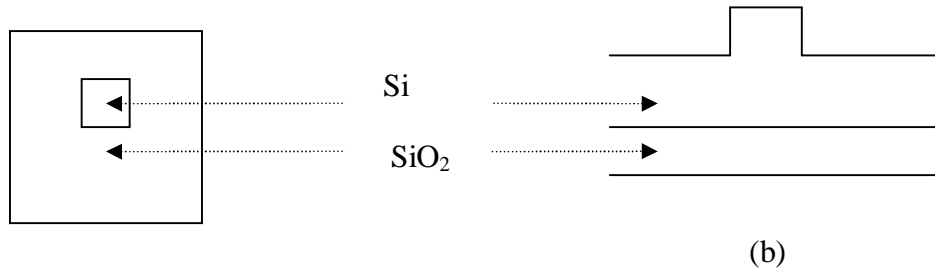


Figure I-7 : schéma d'un guide bidirectionnel. (a) ruban (b) en arête

#### I-4-2-1 Influence de la géométrie sur les modes guidés

Les deux caractères recherchés pour les guides bidimensionnels sont d'une part, le caractère monomode qui limite les pertes de propagation et d'autre part leur insensibilité à la polarisation.[6]

##### I-4-2-1-1 Un guide d'onde monomode

Si le guide est multi mode, il y a plusieurs groupes de rayons, appelés « modes propres du guide » qui se propagent avec des vitesses variables dans le guide, c'est pour cela qu'on cherche à fabriquer un guide monomode, où un seul mode de propagation est excité par la lumière. Pour obtenir le caractère monomode, certaines conditions sont à respecter, et la différence d'indice entre les matériaux du film et ceux de couverture et de substrat doit être suffisamment élevée pour préserver les conditions de réflexion totale.

La géométrie du guide d'onde en arête est la suivante (figure I-8) :

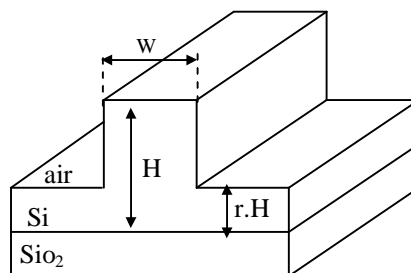


Figure I-8 : Guide d'onde (SOI) en arête

Où :

W : est la largeur du guide.

H : est la hauteur du guide

r : Le paramètre de gravure qui correspond au rapport entre l'épaisseur de l'arête déterminant le confinement latéral et l'épaisseur du guide.

D'après Soref et al. [8], les conditions concernant les dimensions physiques du guide pour qu'il soit monomode sont données par :

$$\frac{W}{H} \leq 0.3 + \frac{r}{\sqrt{1-r^2}} \quad \text{et} \quad 0.5 \leq r \quad (\text{I-16})$$

Ce qui conduit à l'égalité : 
$$\frac{W_m}{H} = 0.3 + \frac{r}{\sqrt{1-r^2}} \quad \text{et} \quad 0.5 \leq r \quad (\text{I-17})$$

Où  $W_m$  représente la largeur minimum de l'arête.

Cette formule a été établie pour des "grands" guides de l'ordre de plusieurs microns de hauteur et dont la seule contrainte est d'être monomode.

Les cas où le paramètre de gravure  $r$  est inférieur à 0,5 n'ont pas été étudiés.

Des études ont montré que les conditions liées à l'équation (I-16) ne sont pas strictes et qu'il est possible de ne pas les respecter tout en conservant les objectifs fixés, c'est-à-dire d'avoir un guide d'onde monomode et insensible à la polarisation. D'après les résultats de ces études, il y a des guides monomodes et insensible à la polarisation qui ont des paramètres de gravure voisins de  $r = 0.4$  et  $w = 1\mu\text{m}$  pour  $H = 1.5\mu\text{m}$ , la hauteur standard de silicium fabriqué par la SOITEC est fixée à cette valeur. [5,6]

#### **I-4-2-1-2 Insensibilité à la polarisation**

##### **a- Différentes polarisations d'une onde électromagnétique**

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

- 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.

### b- Notion d'indice effectif et d'indice de groupe

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.

L'indice de groupe  $n_g$  représente l'indice de propagation de la superposition d'ondes se propageant dans une impulsion lumineuse, non purement monochromatique, dont les longueurs d'onde sont situées autour d'une longueur d'onde centrale. Il est donné par :

$$n_g = n_{eff} - \lambda \cdot \frac{\partial n_{eff}}{\partial \lambda} \quad (I-18)$$

Où  $\lambda$  est la longueur d'onde à laquelle est étudiée l'indice effectif  $n_{eff}$ .

### C- Biréfringence d'indice effectif et d'indice de groupe

S'il y a deux modes TE et TM qui se propagent dans le même guide d'ondes, en général les indices effectifs de ces deux modes sont différents. Cette différence d'indice  $\Delta n_{eff} = n_{TE} - n_{TM}$  est appelée biréfringence. Elle peut être d'indice de groupe ou d'indice effectif suivant l'indice étudié. Si  $\Delta n_{eff} = 0$  on peut conclure que la polarisation n'a pas d'influence sur la propagation; le guide est dit insensible à la polarisation. [5,6]

Plus la valeur de la biréfringence est élevée plus les vitesses de propagation de ces modes sont différentes. Il y a alors un étalement temporel de l'impulsion lumineuse avec la distance parcourue par le paquet d'ondes. Il y a donc une limitation du débit d'information car cette modification temporelle du signal peut entraîner une superposition de différentes impulsions et une perte totale de l'information.

### I-4-3 Les fibres optiques :

#### I-4-3 -1 Généralités

Une fibre optique est un guide d'onde optique à symétrie circulaire tel que schématisé sur la (figure I-9) 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'information (large bande passante). On peut avoir plusieurs canaux de transmission simultanément sur une fibre. [9]

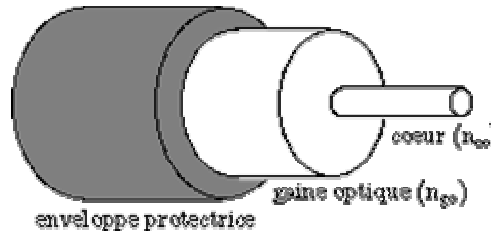


Figure 1-9 : Fibre optique

#### I-4-3 -2 Différents types de fibres :

La fibre optique est constituée en générale d'un milieu diélectrique appelé cœur de la fibre d'indice de réfraction  $n_{co}$ , recouvert d'un matériau appelé gaine d'indice de réfraction  $n_{go}$  inférieur à celui du cœur. L'ensemble est lui-même entouré d'une enveloppe, généralement en plastique, qui a le double rôle de protéger la fibre mécaniquement et de piéger la lumière qui se propage dans la gaine optique, en général indésirable. Si l'on dénude la fibre, c'est-à-dire si on enlève cette enveloppe protectrice, le milieu extérieur est l'air.

Suivant les dimensions du coeur on peut avoir :

- **La fibre optique multimode à saut d'indice**

La fibre à saut d'indice est la fibre la plus classique. Elle est constituée d'un coeur et d'une gaine optique en verre d'indices de réfraction différents. Cette fibre provoque une grande dispersion des signaux la traversant, ce qui génère une déformation du signal reçu.

- **Fibre à gradient d'indice**

Dans une fibre optique à gradient d'indice, l'indice de réfraction du coeur n'est pas constant. Il est plutôt maximal au centre de la fibre et diminue progressivement jusqu'à l'interface de la gaine. Ce profil d'indice de réfraction peut être obtenu en variant la concentration en dopant lors de la fabrication de la préforme. Dans une fibre de ce type, la lumière n'est plus réfléchi à l'interface coeur gaine, mais est plutôt courbée progressivement lorsqu'elle s'en approche (voir la figure I-10).

- **Fibre monomode**

Dans ce type de fibre, le coeur est beaucoup plus petit par rapport à la gaine que dans les fibres optiques conventionnelles (multimodes). Les fibres monomodes, comme leur nom l'indique d'ailleurs, ne peuvent supporter qu'un seul mode de propagation de la lumière. À cause du très petit diamètre du coeur de la fibre monomode, le transport de la lumière se fait sans réflexion. L'avantage de ce type de fibre est qu'il produit peu de *dispersion*; une impulsion lumineuse polychromatique transmise dans la fibre n'est alors que très peu déformée.

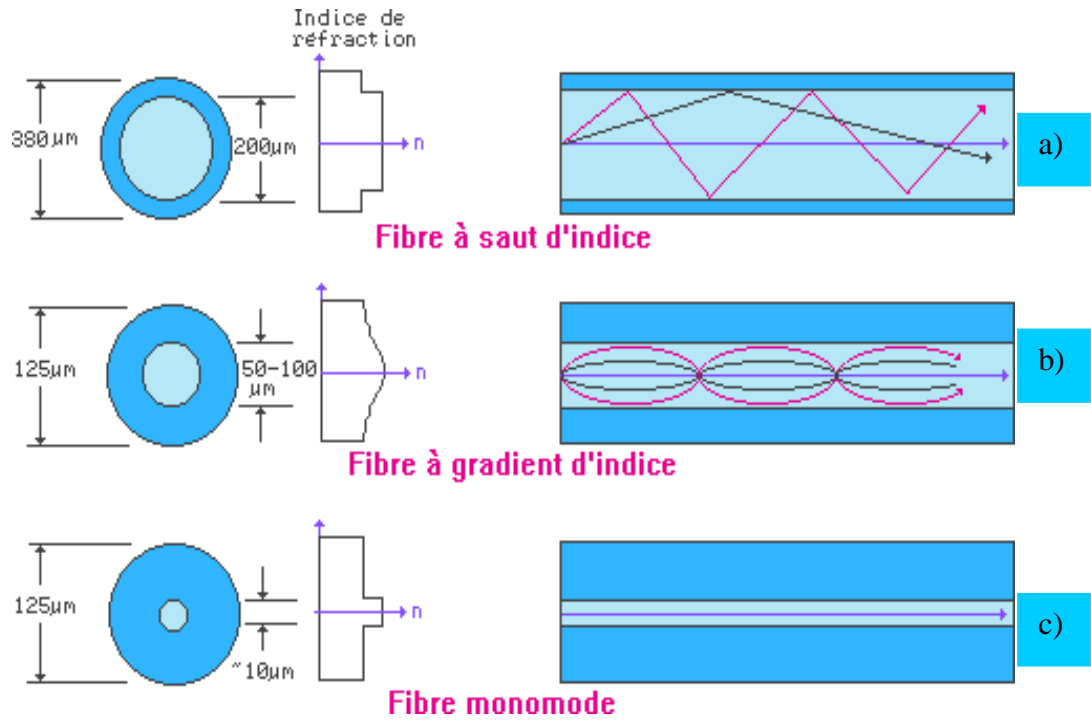


Figure I-10 Profil d'indice de réfraction et trajectoire de la lumière. a) pour une fibre à saut d'indice. b) une fibre à gradient d'indice c) une fibre monomode.

#### I-4-3-3 Matériau pour les fibres optiques :

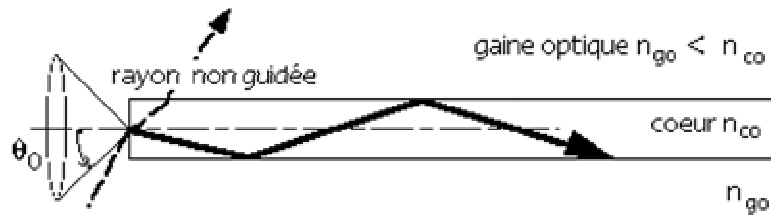
Dans les fibres optiques, l'indice de réfraction du cœur  $n_{co}$  est légèrement supérieur à celui de la gaine  $n_{go}$ . Le matériau qui constitue la fibre optique est la silice  $SiO_2$ . On a deux possibilités pour avoir  $n_{co} > n_{go}$ .

- Ø On augmente l'indice du cœur en  $SiO_2$  en le dopant avec du germanium ( $Ge$ ) ou du phosphore.
- Ø On diminue l'indice de la gaine en la dopant avec le bore ( $B$ ) ou le fluor.

On définit l'état relatif entre les deux indices  $n_{co}$  et  $n_{go}$  tel que :

$$\Delta = \frac{n_{co} - n_{go}}{n_{co}} \quad (\text{I-19})$$



**L'ouverture numérique :**

**Figure I-11 : Guidage de la lumière par réflexion totale. Les rayons ne sont guidés que si l'angle avec lequel ils entrent est inférieur à celui du cône d'acceptance**

Le profil d'indice fait qu'il y a réflexion totale des rayons guidés à l'interface coeur-gaine optique ainsi que le montre schématiquement la figure I-11. Ceci entraîne l'existence d'un cône d'acceptance à l'entrée tel que :

- Tout rayon d'entrée situé dans le cône va se propager dans le coeur par réflexion totale : on a affaire aux *rayons guidés*.
- Tout rayon en dehors du cône va se réfracter à l'interface et sera perdu dans la gaine optique et éventuellement dans l'enveloppe protectrice : ces rayons ne sont pas guidés et occasionnent des pertes de propagation.

Le même cône se retrouve pour les rayons qui sortent de la fibre. On peut ainsi mesurer l'angle  $q_0$  du cône et en déduire l'ouverture numérique **O.N** définie par :

$$O.N = \sin q_0 = \sqrt{n_{co}^2 - n_{go}^2} \quad (I-20)$$

L'ouverture numérique donne des indications sur le couplage de la lumière :

- Ø En entrée : l'ouverture numérique donne une indication sur la facilité de couplage de la lumière dans la fibre.
- Ø En sortie : l'ouverture numérique donne une indication sur la divergence des rayons issus de la fibre optique. [10]

**I-4-3-4 Dispersion intermodale (fibres optiques multimodes à saut d'indice)**

Quand on a plusieurs modes dans la fibre optique, alors le mode fondamental qui est le plus rapide arrive le premier à la sortie de la fibre, ensuite on a les modes moyens et en dernier, on a le mode extrême qui est le plus lent.

La dispersion intermodale correspond à la différence de temps mise entre le mode fondamental et le mode extrême pour arriver au bout de la fibre. Donc on a :

$$\Delta t = t_{ex} - t_0 \quad (I-21)$$

Le mode axial qui arrive le premier avec une vitesse  $v$  et parcourt la longueur ( $l$ ) met un temps :

$$t_0 = \frac{l}{c} \cdot n_{co} \quad (I-22)$$

Où  $c$  est la célérité de la lumière dans le vide.

Le mode extrême possède un temps par rapport au mode fondamental qui est égal :

$$t_{ex} = \frac{l}{\cos q_c} \cdot \frac{n_{co}}{c} \quad (I-23)$$

Après les calculs et les approximations on peut écrire la relation finale de la différence de temps entre le mode fondamental et le mode extrême :

$$\Delta t = \frac{l \cdot n_c}{c} \left[ \frac{1}{2} \left( \frac{O.N}{n_c} \right)^2 \right] \quad (I-24)$$

On définit la capacité de transmission :

$$C_T = \frac{1}{\Delta t} \quad (I-25)$$

et la fréquence de coupure :

$$f_c = \frac{1}{2p\Delta t} \quad (I-26)$$

D'après les deux formules (I-25) et (I-26), on peut dire que ce type de fibre ne convient pas pour des liaisons à grandes distances, on les utilise surtout pour les liaisons à courtes distances et à faible débit. [9,10]

#### **I-4-3-5 Mode guidé des fibres optiques monomodes :**

Dans les fibres monomodes, une onde unique se propage sur l'axe central, donc il y a une suppression complète de la dispersion intermodale.

La solution mathématique complète des fonctions de Bessel montre que la fréquence normalisée  $f$  de la fibre monomode doit être telle que [10] :

$$\frac{p}{l} D_c \cdot ON < 2,405 \quad (I-27)$$

Où :  $D_c$  est le diamètre du cœur de la fibre optique.

Donc on peut obtenir une fibre monomode par réduction du cœur de la fibre optique.

Nous avons dans ce chapitre donné le calcul des modes de propagation à partir des équations de Maxwell en particulier dans un guide d'onde plan, nous avons décrit les guides d'ondes à répartitions d'indice variées qui résultent des différentes technologies de réalisation. Nous avons passé en revue le procédé de fabrication du SOI et donné quelques notions physiques relatives aux fibres optiques.

## **II-1 Introduction**

Les applications des microguides aux télécommunications optiques ne seront viables que si l'information lumineuse provenant d'une fibre optique est transférée efficacement dans le guide d'onde et inversement du guide vers la fibre. Il faut donc s'assurer que le couplage est suffisamment efficace avec ces guides d'ondes malgré leurs faibles dimensions de l'ordre du micron.

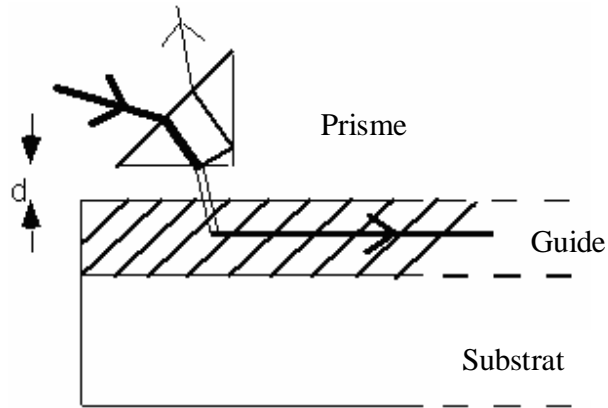
Il existe principalement trois méthodes pour coupler la lumière dans un guide d'onde. Le choix d'une méthode particulière est liée à plusieurs paramètres :

- Ø La sélectivité du couplage : Notamment dans les guides multimodes où il faut pouvoir exciter séparément les différents modes pouvant se propager dans la structure.
- Ø Le caractère monolithique : il est plus pratique d'avoir un moyen de couplage intégré à la structure guidante, en particulier dans le cas des guides enterrés par une couche de passivation.
- Ø La reproductibilité du couplage : la fraction de l'énergie couplée dans le même guide doit être la même à chaque point de la structure.

## **II-2 Les différents types de couplage**

### **II-2-1 Couplage par prisme :**

Le couplage par prisme fut proposé par L.V Iogansen (1962). Bien que sélective, cette méthode perd de son intérêt en raison de son caractère hybride (non monolithique) .le principe du couplage par prisme est schématisé sur la figure (figure II-1). Le couplage d'un mode du guide d'onde se fait par effet tunnel optique au travers du gap d'air. Cette méthode permet d'exciter un seul mode à la fois. Le contrôle de l'épaisseur du gap d'air entre le prisme et la surface du composant est délicat (gap de l'ordre de  $\lambda / 2$ ) [3].



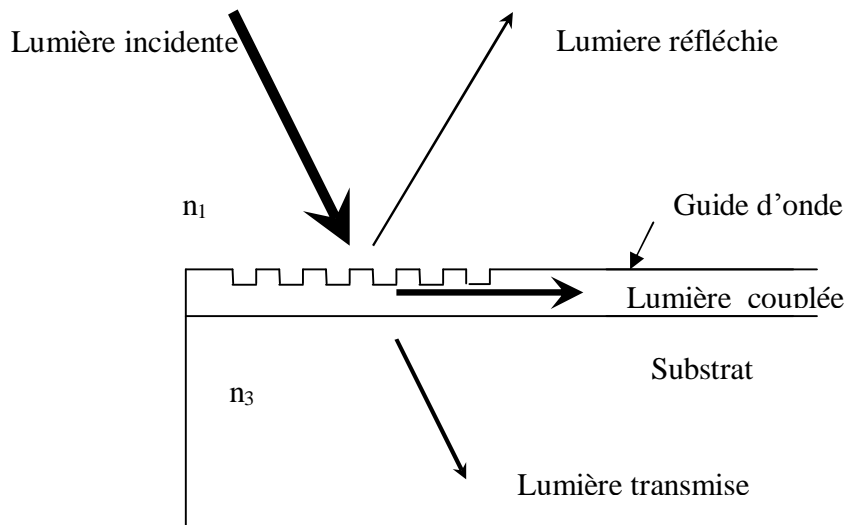
**Figure II-1 couplage par prisme**

### **II-2-2 Couplage par réseau de diffraction :**

La deuxième façon de réaliser le couplage de la lumière vers un guide d'onde est d'utiliser un réseau de diffraction. Ce réseau est composé de motifs périodiques submicroniques comme on peut le voir sur la figure II-2. On note  $\Lambda$  la période des motifs, appelée pas du réseau. La lumière de la longueur d'onde  $\lambda$  qui arrive sur le réseau avec un angle  $\theta_i$ , après avoir traversé un milieu d'indice  $n_3$  est diffractée dans plusieurs directions. Si la lumière diffractée suivant l'ordre  $p$  vérifie la condition de Bragg :

$$\frac{2p}{\Lambda} n_3 \sin(\theta_i) + p \frac{2p}{\Lambda} = \frac{2p}{\Lambda} n_{eff} \quad (\text{II-1})$$

Où  $n_{eff}$  est l'indice effectif d'un des modes du guide plan, alors on couple une partie de la lumière vers ce mode du guide plan [1].



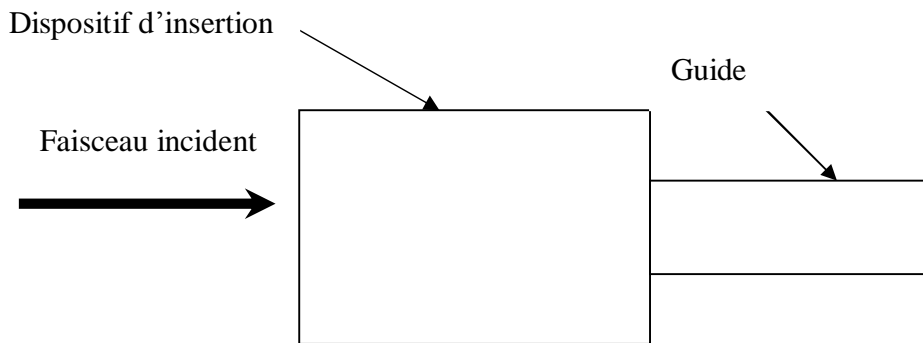
**Figure II-2 : Couplage par réseau de diffraction**

### **II-2-3 Couplage en bout :**

Le couplage en bout consiste à injecter la lumière directement dans le guide par une extrémité (figure II-3). Lorsque le guide fait quelques microns de large et d'épaisseur il suffit d'approcher l'extrémité d'une fibre optique et on peut ainsi obtenir un couplage très efficace. Mais pour les guides qui nous intéressent submicroniques et à fort indice de réfraction l'efficacité de couplage est faible [4]. Il faut alors adapter ce guide.

Une solution est d'amincir progressivement le guide le long de la direction de propagation dans une [6] ou deux dimensions [11] de façon à obtenir une pointe ou un guide de section extrêmement faible.

On réalise ainsi une transition qui permet de déconfiner le mode afin d'augmenter le recouvrement avec le mode fondamental d'une fibre optique qu'on vient placer en bout. Une autre possibilité est de fabriquer par épitaxie une transition pour augmenter progressivement l'épaisseur du guide en bout. [12]

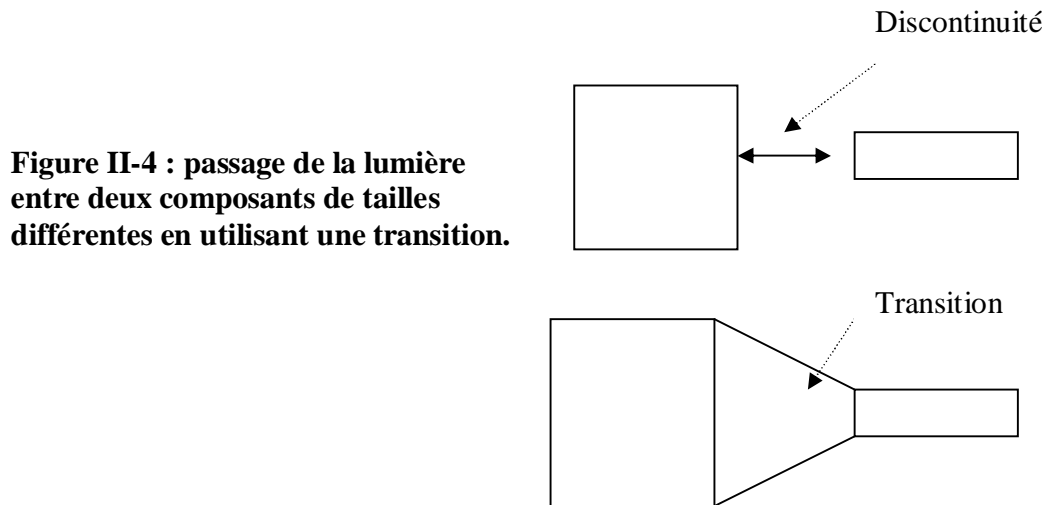


**Figure II-3 : Couplage en bout.**

### **Les transitions :**

Une transition est un composant qui permet de passer d'un guide de section large (fibre optique) à un guide de section beaucoup plus faible (guide submicronique) [1]. Elle correspond aussi à un élargissement progressif le long de la direction de propagation de la lumière dans une direction du guide d'onde jusqu'à la fibre, ce qui permet un couplage guide –fibre correct [6,12]

Quelque soit le composant, nous pouvons distinguer deux types de transitions (tapers) : La transition horizontale et la transition latérale. Concernant cette dernière, il est facile de lui conférer une forme non linéaire correspondant à une transition adiabatique quasi-parfaite par simple gravure. Par contre, ceci est plus compliqué avec la transition horizontale car cette dernière est réalisée avec une étape de croissance de matériau plus difficilement contrôlable. [13]



### II-3 Le simulateur" FIMMPROP"

FIMMPROP est le module de propagation intégré avec FIMMWAVE, c'est un nouvel outil pour simuler la propagation optique dans les guides d'ondes à 2D et 3D. Au cœur du FIMMPROP-3D il y a un programme de calcul extrêmement robuste capable de trouver les solutions rigoureuses des équations d'ondes de Maxwell, des solutions qui sont complètement vectorielles et entièrement bidirectionnelles, tenant compte de toutes les réflexions aux joints à l'interface des différents composants du dispositif, car l'algorithme bidirectionnel modélise toutes les réflexions internes. Ceci rend FIMMPROP capable de modéliser les structures qui sont difficiles à simuler par d'autres méthodes telles que BPM (Beam Propagation Method) du fait qu'il est beaucoup plus rapide et plus précis pour une large gamme de dispositifs.

Dans l'algorithme de la méthode de propagation des faisceaux (BPM), on obtient la propagation pour un seul profil d'entrée par contre dans FIMMPROP on obtient les deux réponses TE et TM en même temps.

Maîtriser "FIMMPROP" nécessite la maîtrise des fonctions de base de FIMMWAVE, tels que les noeuds du guide d'ondes, les solveurs de mode, trouveur de modes,...etc. Un des éléments les plus utiles dans FIMMPROP est la section conique (taper section).



La section conique décrit un dispositif qui change en coupe dans la direction de propagation de la lumière z. [2]

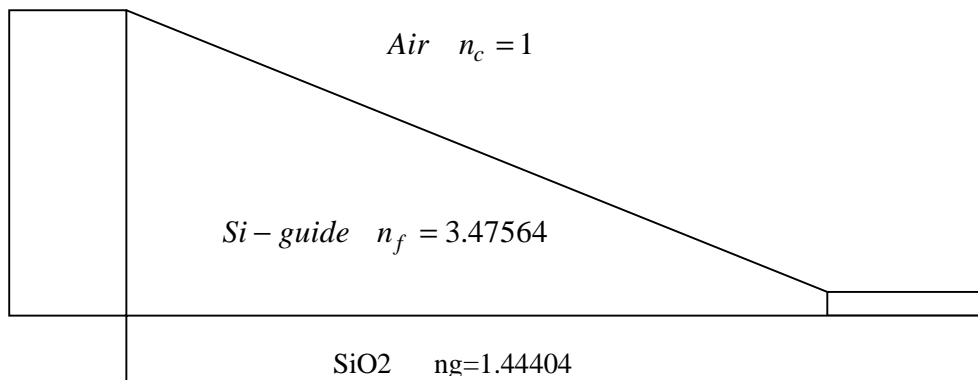
## II-4 Présentation générale de l'outil de simulation" FIMMPROP"

### II-4-1 Conception de la transition

Dans ce qui suit, nous allons détailler la conception de la transition [12]. La structure qu'on va étudier est un empilement de trois couches d'indice de réfraction  $n_f, n_s$  et  $n_c$  tel que  $n_f > n_s > n_c$  (voir figure II-5)

- ü Une couche d'air d'indice de réfraction  $n_c = 1$ .
- ü Une couche centrale (guidante) de silicium d'indice de réfraction  $n_f = 3.47564$ .
- ü Une couche de silice d'indice de réfraction  $n_s = 1.44404$ .

Les valeurs de ces indices de réfraction sont valables pour une longueur d'onde  $1.55\mu\text{m}$ .



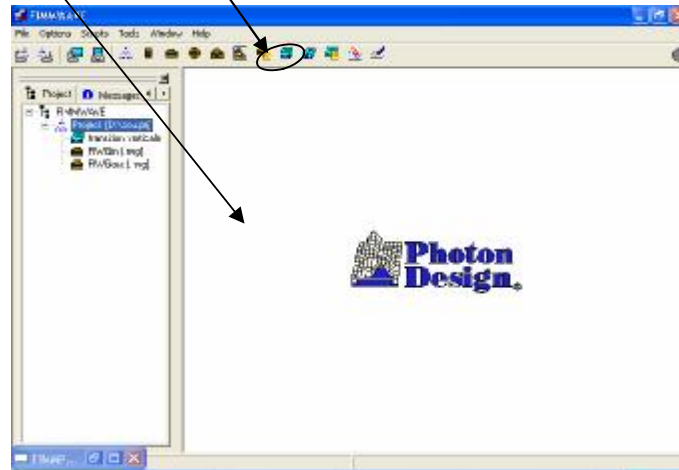
**Figure II -5 : Coupe verticale d'une transition verticale**

Le dispositif est constitué en joignant ensemble divers types d'éléments simples.



A partir de la fenêtre principale "FIMMWAVE", on procède comme suit :

**Node FIMMPROP Device**

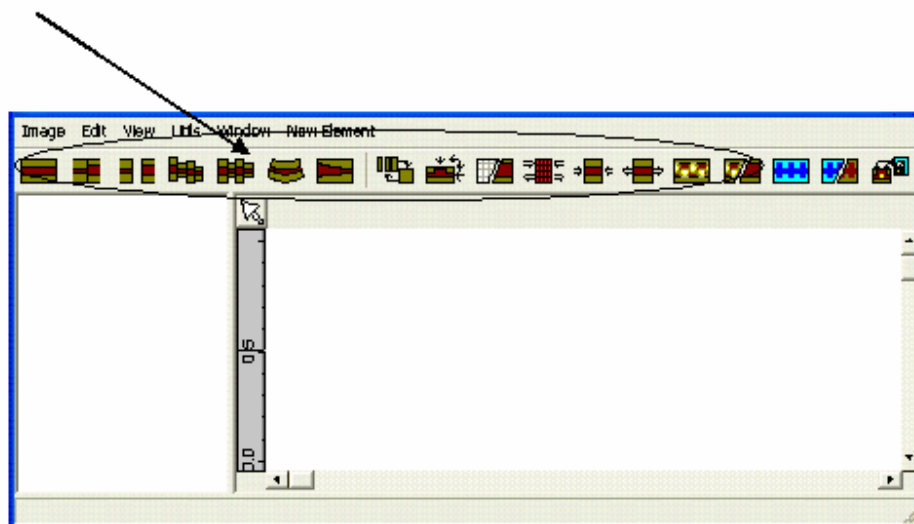
**Project tree Windows**



**Figure II-6 : Fenêtre principale "FIMMWAVE"**

1. On choisit l'icône  dans *Project Tree*, et on ajoute le nœud  FIMMPROP Device, d'où l'éditeur du dispositif : (figure.II-7)

**Les nœuds de la barre d'outil**

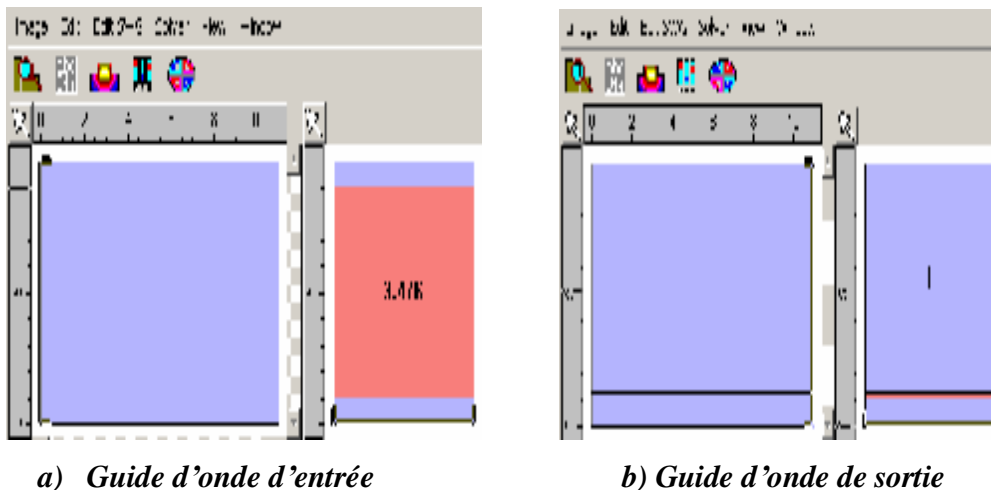


**Figure II-7 : Le panneau d'éditeur du dispositif**

Les nœuds affichés dans de la barre d'outil représentent toute structure qui peut être crée dans " FIMMPROP".


#### **II-4-1-1 Construction du guide d'onde d'entrée et de sortie dans FIMMWAVE (Input section, output section)**

La transition est définie par les sections transversales de guides d'ondes à l'une ou l'autre extrémité plus une fonction d'interpolation déterminant sa variation longitudinale. Les guides d'ondes doivent être équivalents. Ainsi ils doivent avoir le même nombre de couches et de tranches. A partir du logiciel FIMMWAVE, on peut étudier la section d'entrée et la section de sortie de notre transition. Cette étape a déjà été réalisée [14].



**Figure II-8 : Construction d'un guide d'onde (SOI)**

#### **II-4-1-2- Coupe transversale du guide d'onde d'entrée et de sortie dans FIMMPROP**

Dans l'éditeur du dispositif, on crée une section conique en choisissant l'icône 

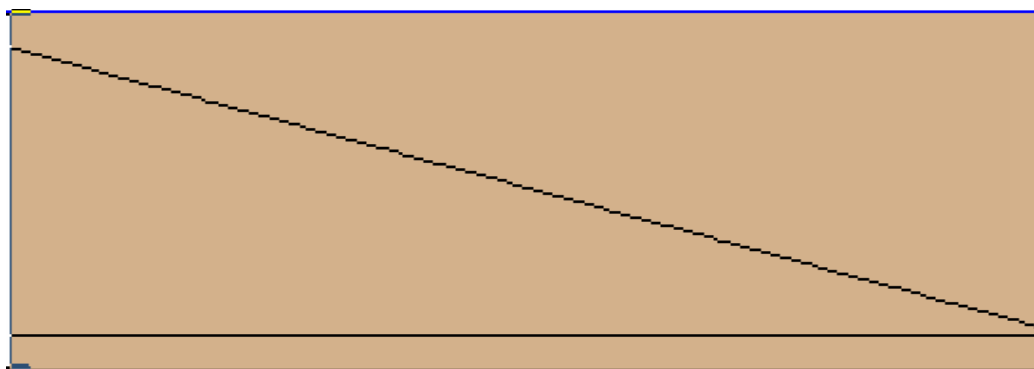
Il est nécessaire d'indiquer le type du guide d'onde définissant ainsi la section transversale du côté gauche et du côté droit respectivement.

On choisit " section d'entrée " et " section de sortie " respectivement. (Figure II-8).

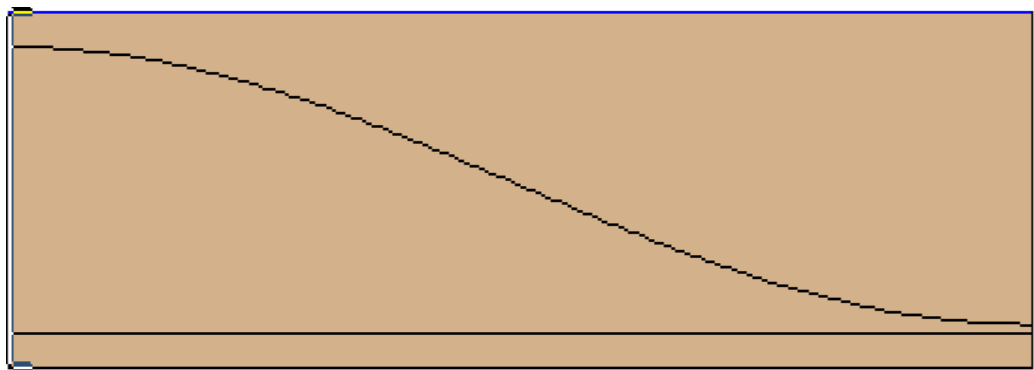
### II-4-1-3 La fonction d'interpolation

La fonction d'interpolation indique comment la section transversale de la structure varie le long de la transition. Le type de la transition est défini selon la fonction d'interpolation choisie. (Figure II-9)

- Interpolation linéaire de la forme : Formule  $(z) z$
- Interpolation sinusoïdale de la forme : Formule  $(z) \sin(z * \pi/2) ** 2$ .....



(a)



(b)

**Figure II-9: Les différentes formes de la transition**

**(a) linéaire (b) sinusoïdale**

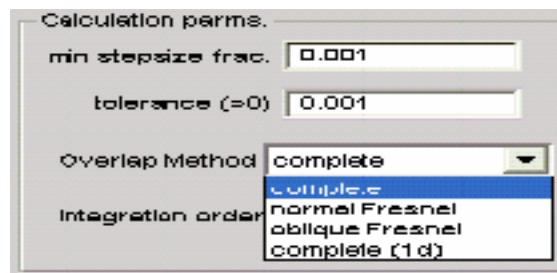
## II-5 Le choix des paramètres d'optimisation

### II-5-1 L'intégrale de recouvrement des modes


Dans le cas général, on applique la méthode mathématique dite "complete method" et ce pour calculer l'intégrale de recouvrement entre les modes d'entrée et de sortie. Notre structure est quasi-2D, on peut donc appliquer "complete (1d) method" qui est une méthode beaucoup plus rapide et plus précise (figure II-10)

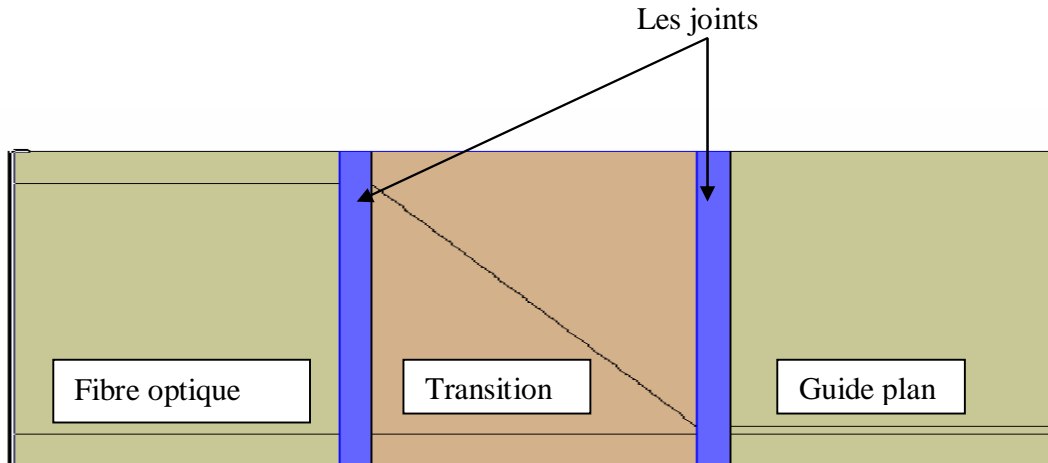
### II-5-2 Ordre d'intégration

Si on choisit la structure d'ordre zéro, la transition se discrétise par une suite de morceaux de sections constantes. Au contraire pour l'ordre un, la transition est considérée linéaire.



**Figure II-10 : les paramètres d'optimisation**

Pour compléter la structure, on doit insérer deux joint simple à l'interface des deux sections (section d'entrée et section de sortie), en choisissant le noeud . (Section d'entrée de 100µm de longueur, section de sortie de 10 µm de longueur et la section de la transition est de 100µm de longueur par exemple).



**Figure II-11 : Vue symbolique**

Les traits horizontaux dans l'élément sont les frontières de la tranche de la section transversale (une vue en plan) Figure II-11.

### **II-5-3 Le panneau des paramètres du solutionneur (indice effectif)**

Une fois qu'on a construit la transition, on est prêt à la charger dans le solutionneur de mode.

On fixe les paramètres *de* MOLAB dans chaque section. Puisque le dispositif est quasi 2D, l'approximation de l'indice effectif sera la plus appropriée (Figure II-12), ainsi les paramètres de MOLAB sont les suivants :

Dans le menu de l'éditeur des paramètres de MOLAB choisissons le solutionneur de l'indice effectif. Fixons la longueur d'onde.

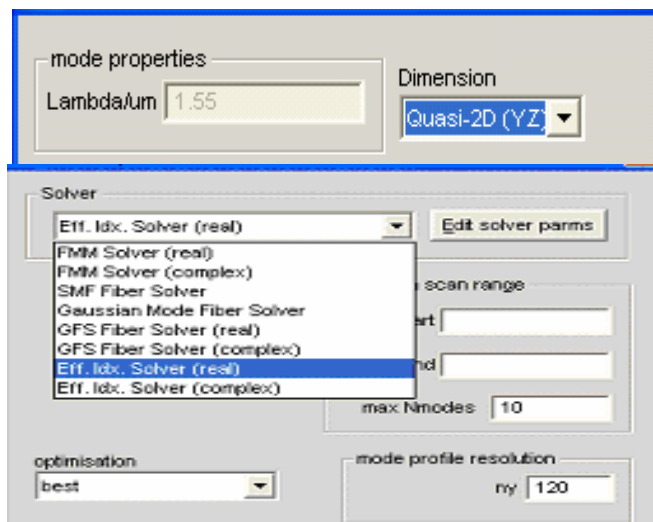
Le type de polarisation est fixé selon le type de la simulation

- ü La simulation semi-vectorielle TE (composante du champ  $E_z$  nulle), seul le champ électrique est transverse.
- ü La simulation semi-vectorielle TM (composante du champ axial  $H_z$  nulle), seul le champ magnétique est transverse.
- ü La simulation vectorielle inclue les deux simulations précédentes.

## Chapitre II Principe de couplage et présentation générale du simulateur « FIMMPROP »

A noter que la simulation de ce dernier type exige un effort numérique beaucoup plus intense que les calculs semi vectoriel, et que les modes hybrides peuvent également être calculés.

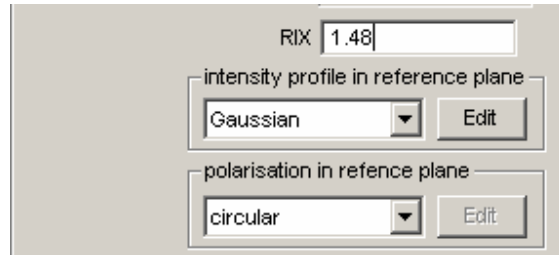
Il faut mentionner aussi que nous pouvons simplifier les calculs en 3D à 2D dans l'intérêt d'augmenter la vitesse de calcul. C'est le cas quand le profil de l'indice de réfraction ne change pas dans tous les guides d'ondes, surtout dans la direction verticale (quasi-2D selon XZ) ou dans la direction horizontale (quasi-2D suivant YZ). Dans ce cas nous pouvons accélérer les calculs en employant la méthode de l'indice effectif pour obtenir les modes. Le principe de cette méthode est expliqué à la fin de ce chapitre.



**Figure II-12 : Les paramètres du solutionneur**

### **II-5-4 L'injection de la lumière**

Pour modéliser le champ électromagnétique issu du cœur d'une fibre optique, on excite notre transition par une lumière gaussienne circulaire (figure II-13).



**Figure II-13 : Profil du champ issu d'une fibre optique**

### II-6 Méthode de discrétisation

Le logiciel FIMMPROP discrétise la transition le long de l'axe de propagation de la lumière en une suite de morceaux de sections constantes, calcule une base de modes dans chaque section puis construit la matrice S de transition suivant un algorithme propre en s'assurant que le calcul est correct. Il faut pour cela que le pas de discrétisation soit suffisamment petit de l'ordre de 0.001 et que les intégrales de recouvrement d'une section à l'autre soient correctement évaluées. [15]

Fimmprop calcule la propagation au sein d'un composant par la méthode de développement modal bidirectionnel. On considère une structure discrétisée le long de l'axe de propagation de la lumière en une suite de morceaux de section constante (voir un exemple sur la figure II-14). Pour chaque morceau  $m$  on détermine un ensemble de modes,  $\{y_i^m\}$ , où  $y_i^m$  est le vecteur formé par les composantes du champ électromagnétique  $E_x, E_y, E_z, H_x, H_y$  et  $H_z$  du mode  $i$  du morceau  $m$ . Pour le calcul numérique, l'ensemble des modes utilisés est limité pour chaque morceau. Pour chaque morceau on peut alors décomposer en chaque point le champ électromagnétique sur les modes du morceau : [1,16]

$$y^m(x, y, z) = \sum_i^N (a_i^m e^{ib_i^m z} + b_i^m e^{-ib_i^m z}) y_i^m(x, y)$$

N : Nombre des modes propres

$y^m$  : Champ électromagnétique total

$y_i^m$  : Modes locaux guidés et radiés



## Chapitre II Principe de couplage et présentation générale du simulateur « FIMMPROP »

$a_i^m$  et  $b_i^m$  : sont les coefficients du champ électromagnétique dans chaque section (forward et bakward)

$b_i$  : Constante de propagation

À chaque interface entre les morceaux  $m$  et  $m + 1$  on calcule une matrice de transition (matrices B et D sur la figure II-14) :

$$S^{(m+1,m)} = \langle \mathbf{y}^{m+1}, \mathbf{y}^m \rangle$$

D'une interface à l'autre du morceau  $m$  on calcule une autre matrice de transition (matrices A, C et E) : [1,15]

$$D^{(m)} = \text{diag}[\exp(ib_i^m z), \exp(-ib_i^m z)]$$

On peut alors écrire entre les coefficients d'amplitude  $\mathbf{c} = [\mathbf{a}, \mathbf{b}]$  des morceaux  $m$  et  $m + 1$  la relation :

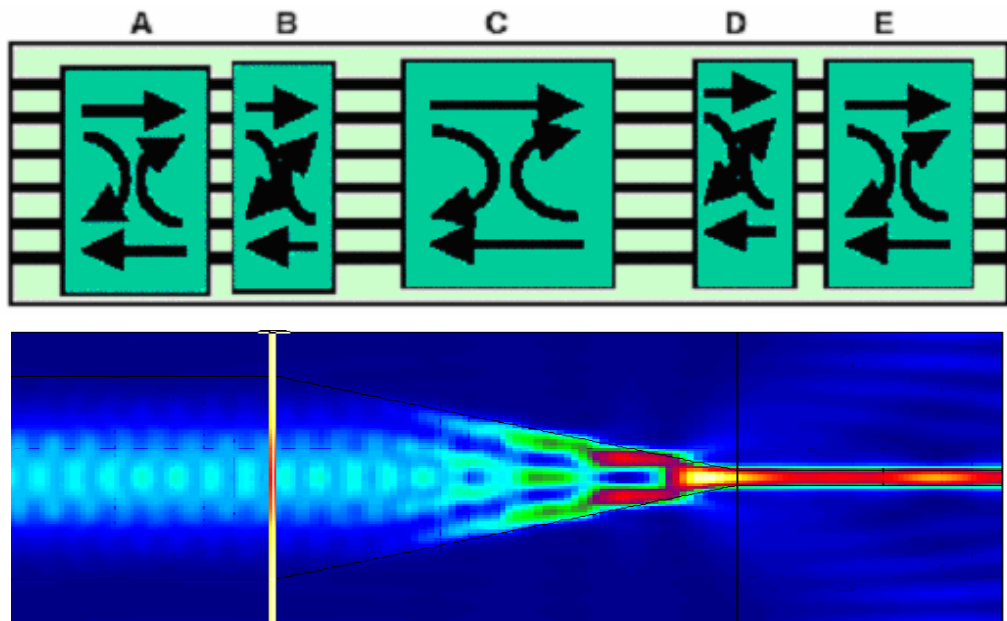
$$\mathbf{c}^{m+1} = S^{(m+1,m)} D^{(m)} \mathbf{c}^m$$

En composant les matrices de chacun des  $M$  morceaux on obtient la matrice de transition du composant reliant la décomposition concernant les modes de la section d'une extrémité du composant à la décomposition relative aux modes de la section à l'autre extrémité : [1]

$$S^{(M,1)} = S^{(M,M-1)} D^{(M)} \dots S^{(2,1)} D^{(1)}$$

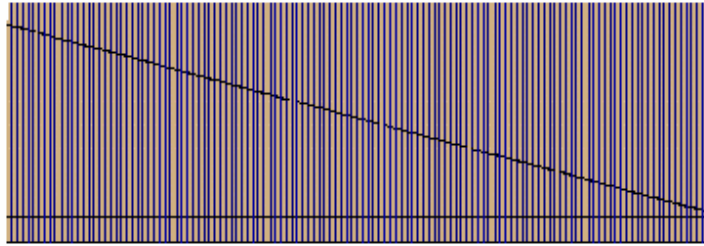
Une fois la matrice  $S^{(M,1)}$  connue, on peut très rapidement calculer la réponse du dispositif à une excitation quelconque décomposée pour les modes d'une des extrémités du composant. De plus, modifier une section ne nécessite que de calculer la nouvelle matrice de diffusion de cette section

puis de réutiliser les autres déjà calculées pour obtenir la matrice de diffusion du composant total. On peut aussi rapidement calculer la réponse du composant à différentes excitations, puisqu'on réutilise la même matrice de diffusion. Par contre le calcul pour un composant dont la section varie continûment (dans notre cas : transition) nécessite de diviser celui-ci en sous morceaux de section constante, ce qui est fait automatiquement par Fimmprop.




**Figure II-14 : Décomposition en matrices S d'une transition.**

Durant les calculs les lignes verticales apparaîtront dans la section conique illustrant la discrétisation numérique (figure II-15). Les algorithmes dans FIMMPROP emploient un pas d'ordre minime pour réduire le temps de calcul requis pour une précision donnée. Ainsi les lignes de discrétisation généralement ne seront pas uniformément distribuées mais se concentreront autour des secteurs coniques qui sont numériquement difficiles à calculer.



**Figure II-15 : Discrétisation de la structure**

- **II-6-1 Les matrices de dispersion et la méthode de calcul (Scattering matrix)**

Lorsque FIMMPROP trouve les modes exigés pour les trois sections utilisés il fera appel à la matrice de dispersion. On choisit le noeud  de la barre d'outil.

Dans FIMMPROP, la matrice de dispersion a la forme :  $\{ T^l, T^r, R^l, R^r \}$  est définie en exprimant les coefficients du champ de sortie  $C^{lb}, C^{rf}$  en fonction de ceux du champ d'entrée  $C^{lf}, C^{rb}$  :

$$C^{rf} = T^l C^{lf} + R^r C^{rb} \quad ; \quad C^{lb} = R^l C^{lf} + T^r C^{rb}$$

Avec :

$T^l$  Les coefficients de transmission du côté gauche.

$T^r$  Les coefficients de transmission du côté droit.

$R^l$  Les coefficients de réflexion du côté gauche.

$R^r$  Les coefficients de réflexion du côté droit.

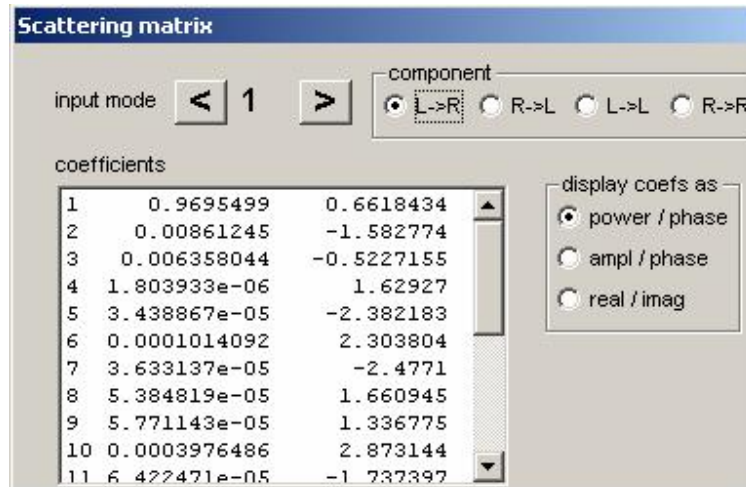



Figure II-16 : Matrice de dispersion

Pour une longueur de  $1000\mu\text{m}$  d'une transition, on remarque que 96.95% de la puissance est concentré dans le mode fondamental (figure II-16).

### II-7 Visualisation du profil du champ à la sortie de la transition

On choisit  pour visualiser le profil du champ qui résulte pour n'importe quel mode d'entrée. Une représentation graphique du champ propagé apparaîtra. On peut voir clairement qu'une grande partie de la lumière injectée est perdue dans le rayonnement. (Figure II-17)

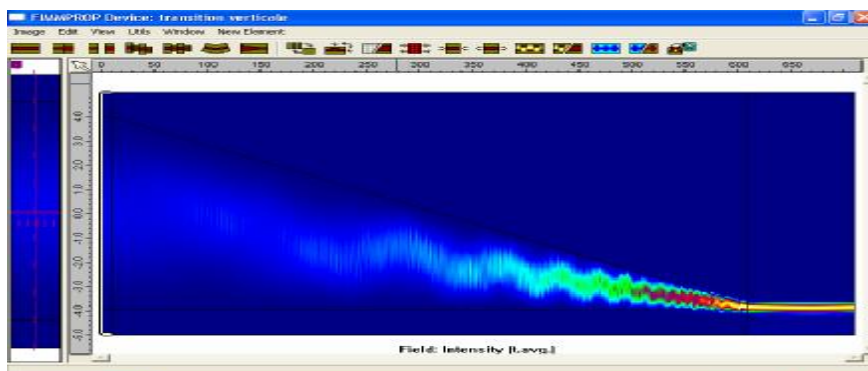


Figure II-17 : la carte de l'intensité de la lumière

### II-8 La méthode de l'indice effectif :

La méthode de l'indice effectif est une méthode approchée simple et efficace pour obtenir les solutions de l'équation de Helmholtz à deux dimensions ; cette dernière s'écrit par la relation :

$$\frac{\partial^2 \mathcal{Y}_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \mathcal{Y}_y}{\partial y^2} + [k^2 n^2(x, y) - b^2] \mathcal{Y}_y = 0 \quad (\text{II-2})$$

Le principe de base de cette méthode est que le champ électromagnétique s'écrit comme le produit de deux champs indépendants (séparation des variables) : [17]

$$\mathcal{Y}_y(x, y) = X(x)Y(y). \quad (\text{II-3})$$

On remplace la formule (II-3) dans l'équation (III-2) et on la divise par  $XY$  pour obtenir l'équation (II-4)

$$\frac{1}{X} \frac{d^2 X}{dx^2} + \frac{1}{Y} \frac{d^2 Y}{dy^2} + [k^2 n^2(x, y) - b^2] = 0 \quad (\text{II-4})$$

Ensuite, on additionne et on soustrait à l'équation précédente la valeur  $k^2 n_{eff}^2(x)$  qui est indépendante de l'axe  $y$ , et on la sépare en deux équations indépendantes :

$$\frac{1}{Y} \frac{d^2 Y}{dy^2} + [k^2 n^2(x, y) - k^2 n_{eff}^2(x)] = 0 \quad (\text{II-5})$$

$$\frac{1}{X} \frac{d^2 X}{dx^2} + [k^2 n_{eff}^2(x) - b^2] = 0. \quad (\text{II-6})$$

La méthode de l'indice effectif semble efficace pour simuler la propagation de la lumière en utilisant l'outil " FIMMPROP " à cause de la complexité des phénomènes physiques. Il est impossible de développer une méthode analytique qui permet de calculer toutes les grandeurs physiques souhaitées, du fait d'une certaine imprécision ainsi que la lenteur du temps de calcul.

### III-1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter les deux types de transitions (latérale et verticale) et interpréter les résultats obtenus par simulation des différents paramètres caractéristiques des dispositifs à l'aide du logiciel FIMMWAVE et de son module FIMMPROP. Le calcul numérique a été fait selon la méthode dite de l'indice effectif.

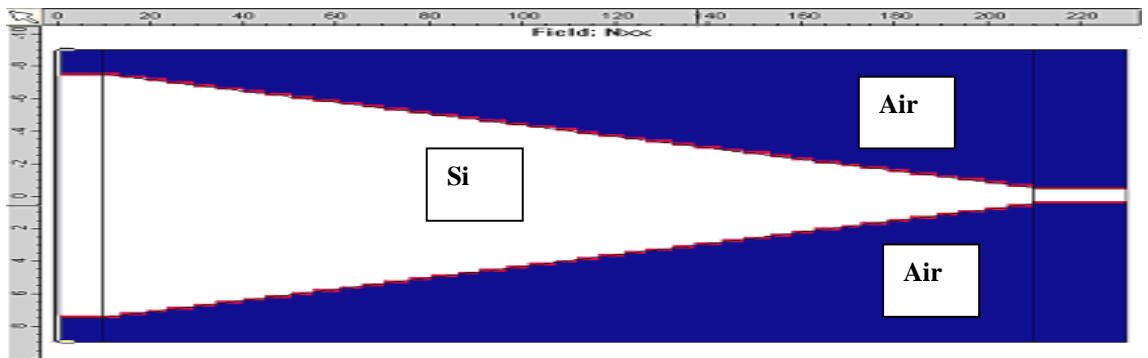
### III-2 LA TRANSITION LATÉRALE

#### III-2-1 LA GEOMETRIE DE LA TRANSITION

Nous avons choisi d'utiliser une transition latérale linéaire (figure III-2-1). Cette dernière est un composant qui permet de passer d'un guide à un autre. Dans notre cas d'un guide large (fibre optique monomode de  $10\mu\text{m}$  de diamètre) à un guide de section beaucoup plus faible (guide en arête). La longueur de la couche guidante de la transition change le long de l'axe de propagation. Par contre sa hauteur est maintenue constante.

La section d'entrée est de  $15\mu\text{m}$  de largeur et  $1.5\mu\text{m}$  de hauteur et la section de sortie a une largeur de  $1\mu\text{m}$ . La transition et le guide d'onde admettent un même substrat  $\text{SiO}_2$  avec une hauteur de  $1\mu\text{m}$ . [6, 18]

La structure de couplage guide-fibre par cette transition est la suivante : (figure III-2-1)



**Figure III-2-1 : Carte des indices de réfraction de la transition latérale (Coupe transversale)**

### III-2-2 CARACTERISTIQUES DE LA FIBRE OPTIQUE :

Nous avons choisi à l'entrée de la transition une fibre optique monomode. Elle présente, par rapport à la fibre multimode, l'avantage d'avoir une bande passante plus élevée. La fibre multimode est généralement réservée pour les liaisons à courte distance et à faible débit. Nous avons donc choisi une fibre optique monomode à saut d'indice.

On peut donc exciter notre système en entrée par une gaussienne circulaire, de  $15\mu\text{m}$  de largeur à  $\frac{1}{e^2}$  qui modélise le champ électromagnétique issu du cœur d'une fibre optique.

### III-2-3 CARACTERISTIQUES DU GUIDE D'ONDE RIB :

A la sortie de la transition latérale, nous avons choisi un guide en arête monomode (figure III-2-3). Les composants optoélectroniques mettent en œuvre ce type de guide d'onde qui doit très souvent être compatible avec les fibres monomodes permettant un couplage entre la fibre et le guide.

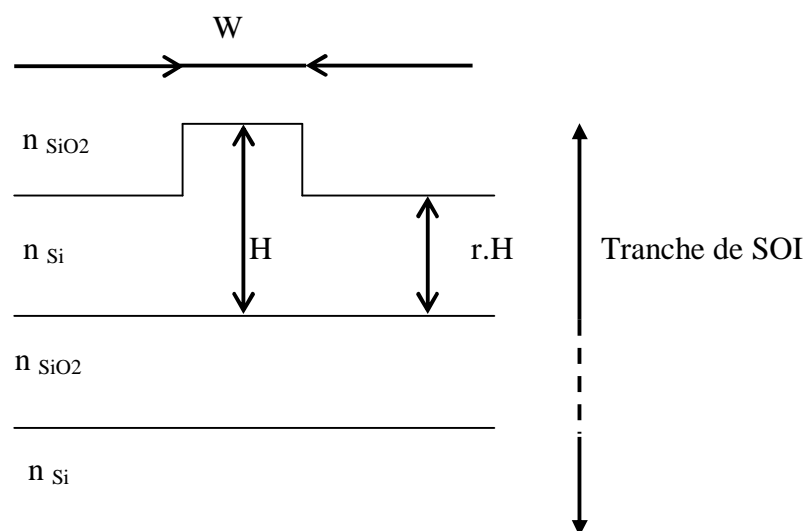


Figure III-2-3 : schéma en coupe du guide en arête choisi

W : La largeur

du guide.

H : La hauteur du guide

$r$  : LE paramètre de gravure qui correspond au rapport entre l'épaisseur de l'arête déterminant le confinement latéral et l'épaisseur du guide.

Les paramètres correspondants à notre guide en arête monomode sont : [5,6]

$W=1\mu\text{m}$ ,  $H=1.5\mu\text{m}$ ,  $r=0.40$

### III-2-4 RESULTATS DE SIMULATION ET INTERPRETATION

#### a- Le profil de l'intensité à l'entrée du guide

A l'entrée de la transition, Le faisceau optique est issu d'une fibre monomode ( $10\mu\text{m}$ ). Nous supposons que le champ à l'entrée du composant est gaussien circulaire nous définissons le diamètre comme étant la largeur à  $1/e^2$  de la gaussienne de la puissance optique. (Figure III-2-4)

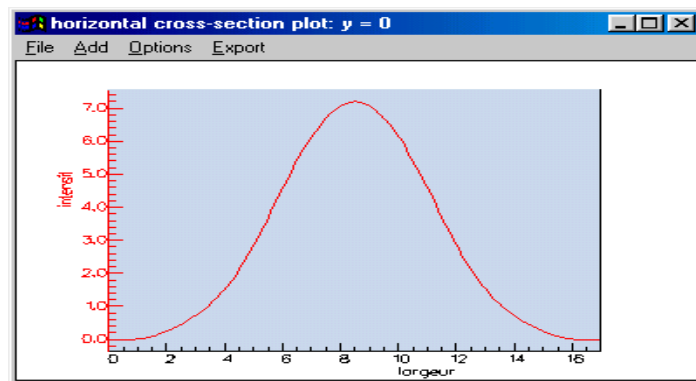


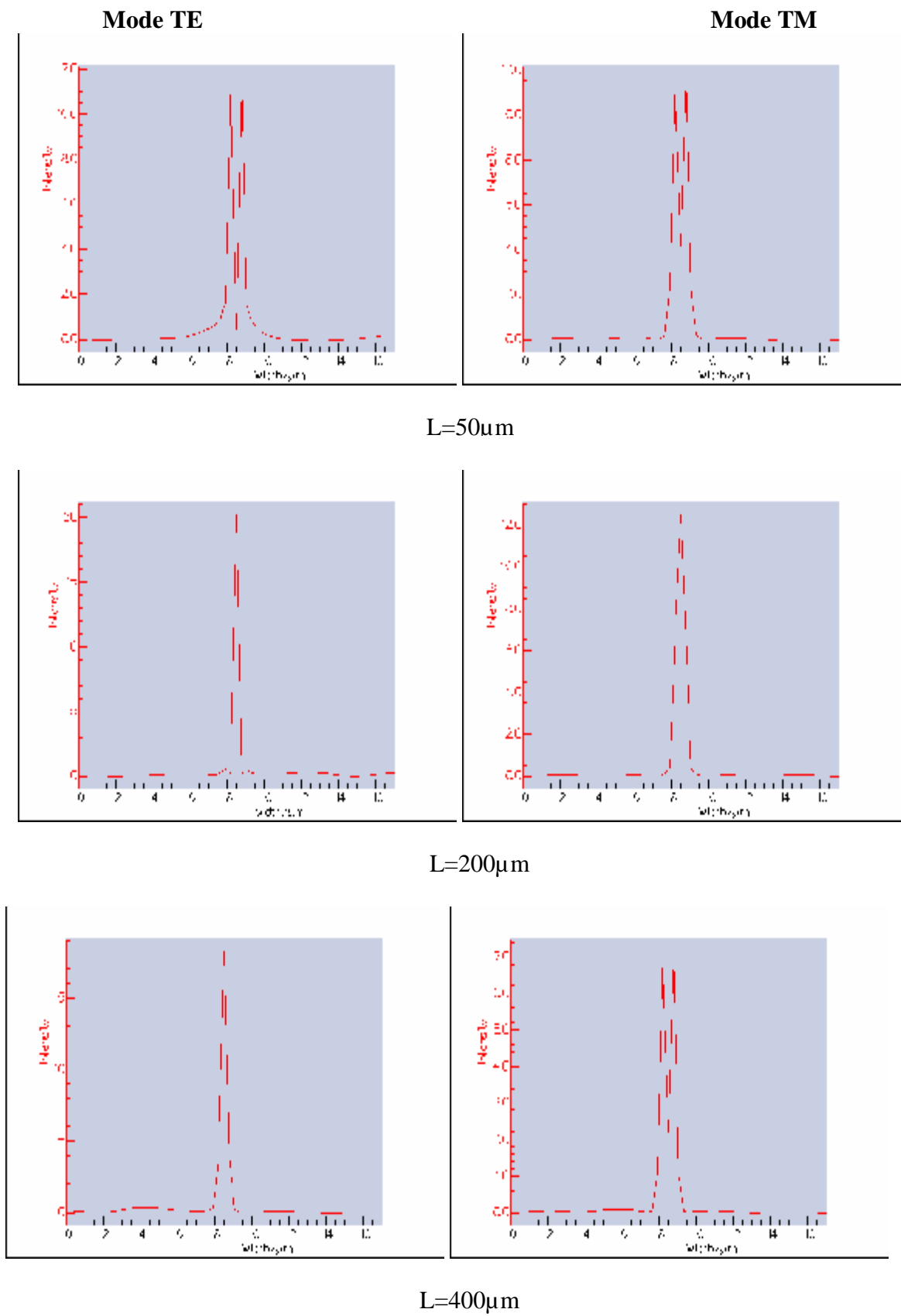
Figure III-2-4 Le profil de l'intensité à l'entrée du guide

#### b- Le profil de l'intensité à la sortie du guide

#### \*OPTIMISATION DES DIFFERENTES LONGUEURS DE LA TRANSITION

On étudie l'influence de la longueur de la transition sur l'efficacité du couplage, dans le but de trouver la longueur optimale qui maximise la conservation de la puissance dans le mode fondamental. C'est à dire que le premier mode normal local de la structure s'y propage sans transfert de puissance vers les autres modes normaux locaux d'ordres supérieurs, on a opté pour trois longueurs de transition  $50\mu\text{m}$ ,  $200\mu\text{m}$  et  $400\mu\text{m}$ . (Figure III-2-5).





**Figure III-2-5 Profils des modes dans une transition pour une excitation circulaire dans le plan perpendiculaire à la propagation et suivant la largeur du guide**

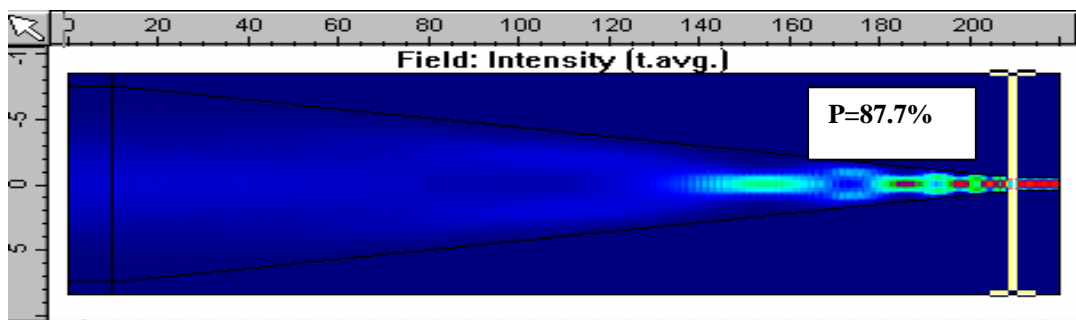
Les profils du champ en mode TE sont meilleurs que ceux en mode TM :

\* Pour une longueur de  $50\mu\text{m}$  on constate que la transition est trop courte ce qui permet au mode fondamentale de se coupler avec les autres modes d'ordre supérieur. L'allure du profil de champ est insatisfaisante à la sortie de la transition.

\* Une longueur de  $200\mu\text{m}$  donne un seul pic ceci veut dire que presque toute l'énergie est concentrée dans le mode fondamental, cependant pour  $L=200\mu\text{m}$  le profil du mode est proche de celui du mode fondamental. Cette longueur est optimale car elle permet une meilleure intégration.

\* Une longueur de  $400\mu\text{m}$  donne un seul pic en mode TE seulement cette transition reflète un profil du champ en mode TE différent de celui en mode TM. (transition sensible à la polarisation).

On a visualisé l'intensité de la lumière pour  $L= 200\mu\text{m}$  et on a calculé un coefficient de transmission de la puissance en mode fondamental qui est de l'ordre de 87.7% de la puissance d'entrée, seulement une perte de 12.3 % de la lumière a été observée. (Figure III-2-6)



**Figure III-2-6 La carte d'intensité du champ obtenue avec FIMMPROP**

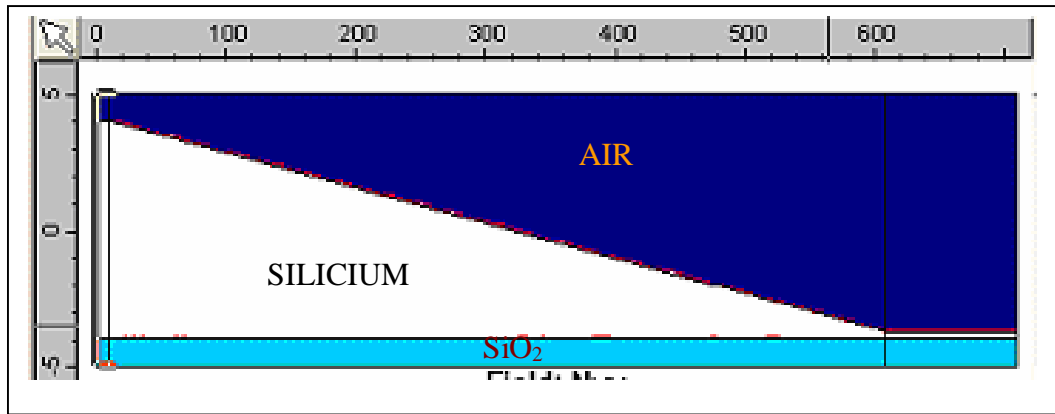
### III-3 LA TRANSITION VERTICALE

#### III-3-1 LA GEOMETRIE DE LA TRANSITION

Nous avons choisi d'utiliser une transition verticale linéaire où la hauteur de la couche guidante change le long de la structure par contre la largeur reste constante.

Ici la section d'entrée est une section de  $11\mu\text{m}$  de largeur et de  $8\mu\text{m}$  de hauteur et la section de sortie a une largeur de  $11\mu\text{m}$ . La transition et le guide d'onde ont un même substrat  $\text{SiO}_2$  avec une hauteur de  $1\mu\text{m}$ . [12,19]

La structure de couplage guide-fibre par cette transition est la suivante :(Fig. III-3-1)



**Figure III-3-1 : carte des indices de réfraction de la transition verticale  
(Coupe verticale)**

Elle correspond à un élargissement progressif dans la direction verticale du guide d'onde jusqu'à la fibre, qui permet un couplage guide-fibre correct.

La transition se compose de :

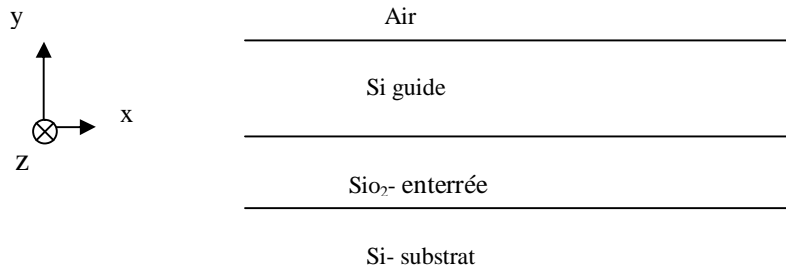
### III-3-2 LA FIBRE OPTIQUE

La fibre est monomode de diamètre du cœur  $8\mu\text{m}$ . Pour modéliser le champ électromagnétique issu du cœur de la fibre optique, il faut exciter la transition en entrée par une gaussienne circulaire, de  $11\mu\text{m}$  de largeur à  $\frac{1}{e^2}$ .

### III-3-3 GUIDE D'ONDE PLAN

Pour déterminer l'épaisseur de la couche de silice et l'épaisseur de la couche guidante il faut étudier le caractère monomode du guide.

On s'intéresse donc à la recherche du caractère monomode du guide qui limite les pertes de propagation. [7]



**Figure III-3-2 structure d'un guide d'onde plan (SOI) type SIMOX**

La structure qu'on va étudier est un empilement de quatre couches d'indice de réfraction  $n_1$ ,  $n_2$ ,  $n_3$  et  $n_4$ , tel que  $n_2 \gg n_3 \gg n_1$ . (Figure III-3-2).

- une couche d'air d'indice de réfraction  $n_1=1$ .
- une couche centrale (guidante) de silicium d'indice de réfraction  $n_2=3.47564$ .
- une couche de silice d'indice de réfraction  $n_3=1.44404$
- une couche de substrat de silicium d'indice de réfraction  $n_4=3.47564$

Les valeurs de ces indices de réfraction sont valables pour une longueur d'onde de  $1.55\mu\text{m}$ .

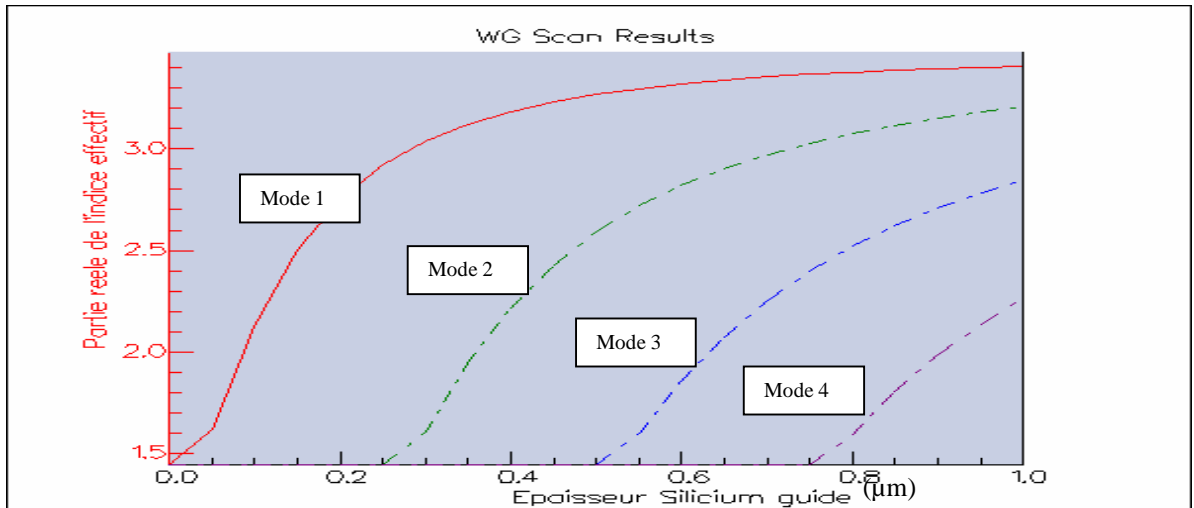
Il s'agit d'une couche mince de silicium formant le film guidant sur une couche d'oxyde. Les calculs sont effectués grâce au logiciel Fimmwave en utilisant la méthode de l'indice effectif.

### III-3-4 RESULTATS DE SIMULATION ET INTERPRETATION

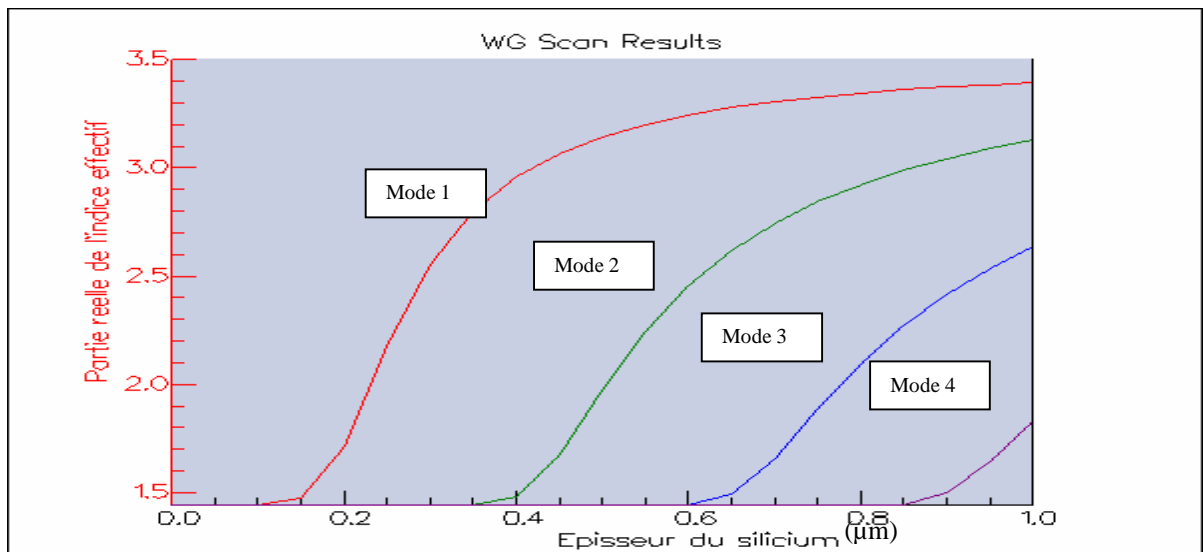
#### III-3-4-1 OPTIMISATION DE L'ÉPAISSEUR DE LA COUCHE ACTIVE

En premier lieu les calculs sont effectués, en faisant varier l'épaisseur de la couche guidante tout en fixant l'épaisseur de la couche de silice enterrée à  $0.35\mu\text{m}$ .

L'évolution des propriétés des modes guidés en fonction des variations des épaisseurs de la couche guidante de silicium et de la couche de silice enterrée (Figure III-3-3).



(a) Mode TE



(b) Mode TM

**Figure III-3-3 : La variation de la partie réelle de l'indice effectif des modes (a) TE et (b) TM en fonction de l'épaisseur de la couche active en µm.**

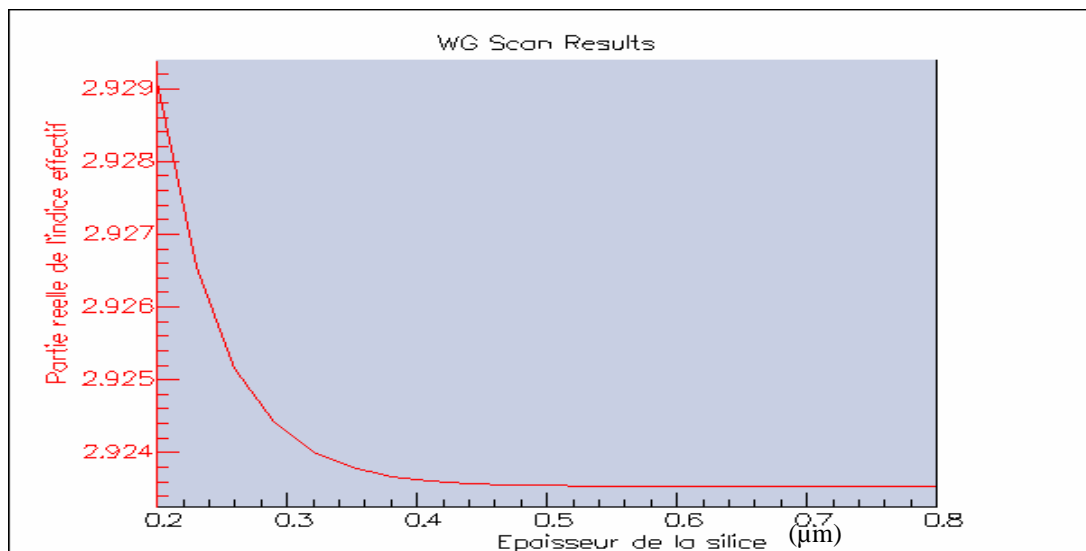
On constate, que la partie réelle de l'indice effectif associée à un mode augmente et tend vers la valeur de 3.475654 correspondant à l'indice de réfraction du film guidant de silicium. On voit que lorsqu'on augmente l'épaisseur du film guidant, la structure supporte de plus en plus de modes guidés.

A partir de ces courbes, on peut définir l'épaisseur de coupure associée à chaque mode. C'est l'épaisseur du film guidant pour laquelle la partie réelle de l'indice effectif du mode est égale à l'indice de réfraction de la silice enterrée, en dessous de cette valeur on a à faire à des modes rayonnant dans le substrat.

Pour que le guide d'onde plan soit monomode, il faut que l'épaisseur de silicium guide soit inférieure à  $0.25\ \mu\text{m}$  dans le cas d'une polarisation TE et inférieure à  $0.35\ \mu\text{m}$  dans le cas d'une polarisation TM, au delà de ces deux épaisseurs la structure devient multi mode.

### III-3-4-2 OPTIMISATION DE L'ÉPAISSEUR DE LA COUCHE ENTERRÉE

En deuxième lieu, les calculs sont effectués, en faisant varier l'épaisseur de la couche de silice enterrée, tout en fixant l'épaisseur de la couche active à  $0.25\ \mu\text{m}$  (Figure III-3-4)



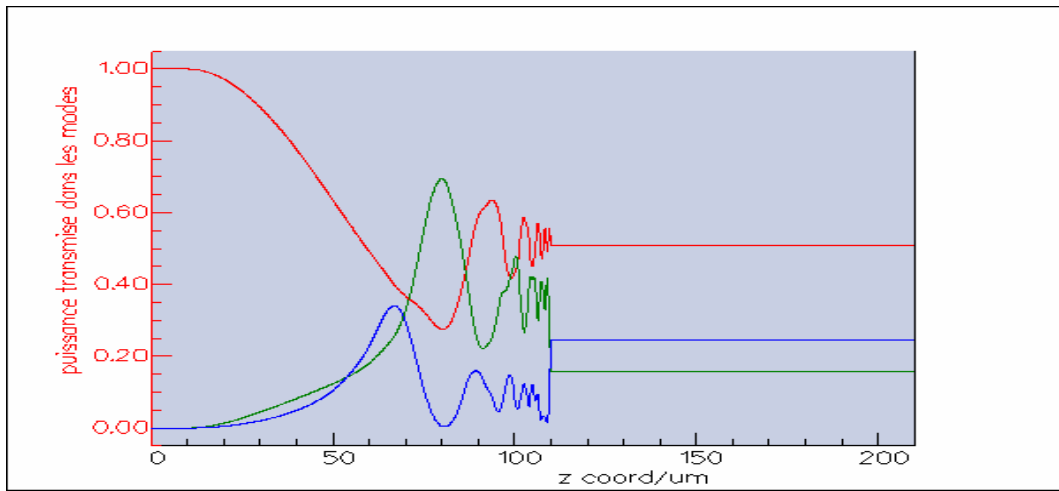
**Figure III-3-4 Evolution de la partie réelle de l'indice effectif du mode  $TE_0$  en fonction de l'épaisseur de la couche de silice enterrée.**

On peut constater que la partie réelle de l'indice effectif du mode  $TE_0$  décroît lorsqu'on augmente l'épaisseur de la couche de silice enterrée, et tend vers une valeur constante. Donc l'épaisseur de la couche de silice doit être supérieure à  $0.5\mu\text{m}$ .

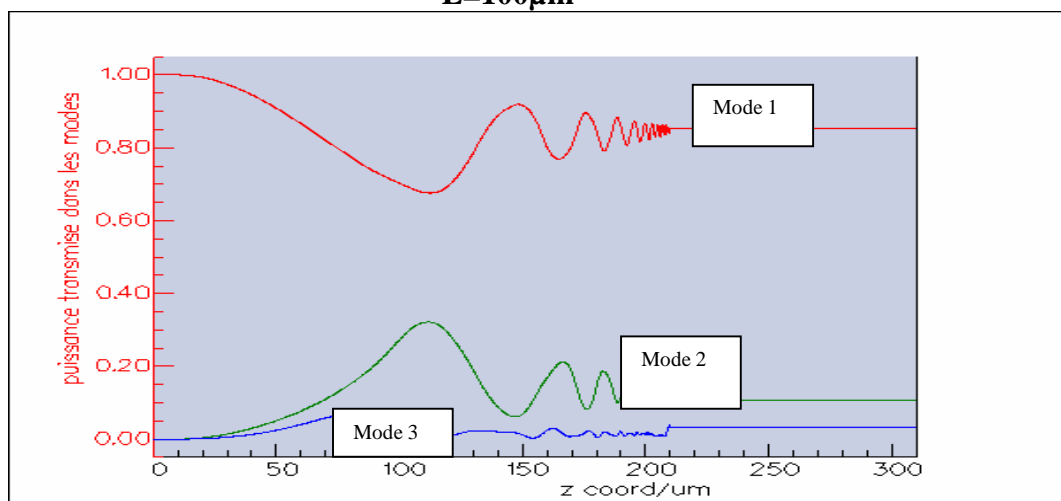
On peut choisir une hauteur de la section de sortie de  $0.25\mu\text{m}$  et une épaisseur de la couche de silice enterrée de  $1\mu\text{m}$ .

### III-3-4- 3 OPTIMISATION DES DIFFERENTES LONGUEURS DE LA TRANSITION

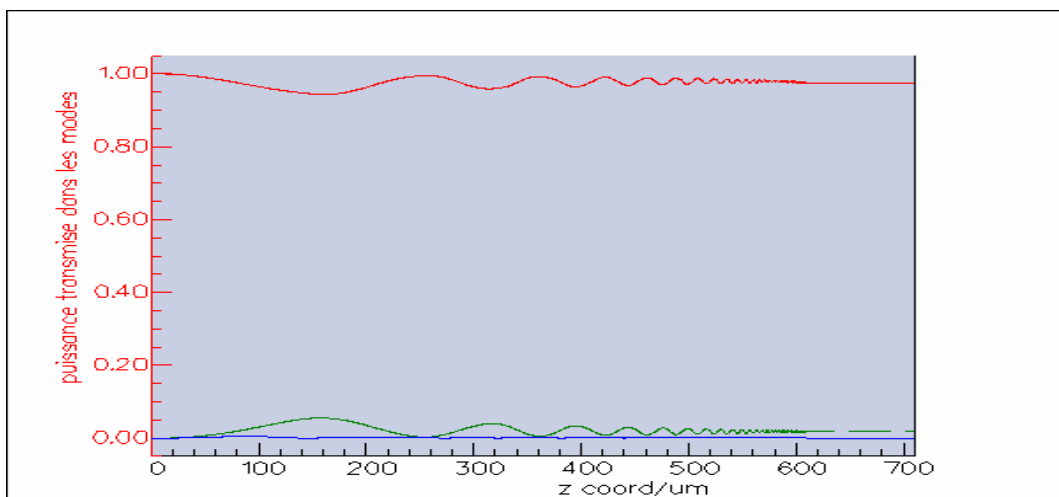
Le caractère monomode du guide (la hauteur de la section de sortie et l'épaisseur du substrat), est déterminé par "FIMMWAVE". En utilisant FIMMPROP nous avons étudié l'influence de la longueur de transition qui régit ce couplage. Pour cela les simulations effectuées donnent la distribution de la puissance totale dans chacun des modes de la transition (figure III.3.5) et la répartition de la puissance totale du champ électromagnétique en mode TE (figure III.3.6). Différentes longueurs de transition ont été étudiées (de  $100$  à  $1000\mu\text{m}$ ).



**L=100 $\mu$ m**

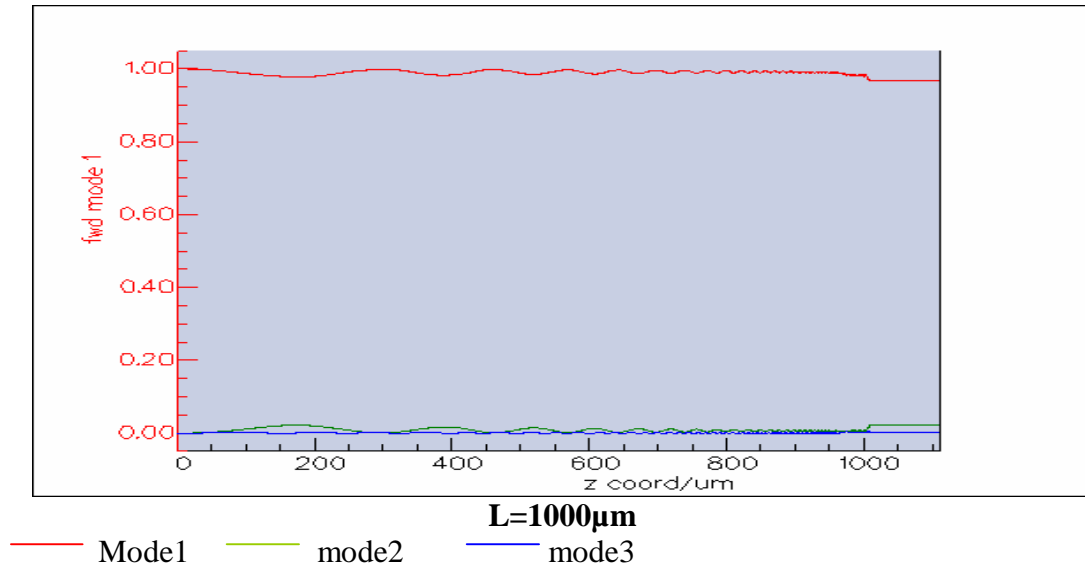


**L=200 $\mu$ m**



**L=600 $\mu$ m**





**FigureIII-3-5 Distribution de la puissance totale dans chacun des modes de la transition en mode TE pour  $L=100\mu\text{m}$ ,  $L=200\mu\text{m}$ ,  $L=600\mu\text{m}$  et  $L=1000\mu\text{m}$  respectivement**

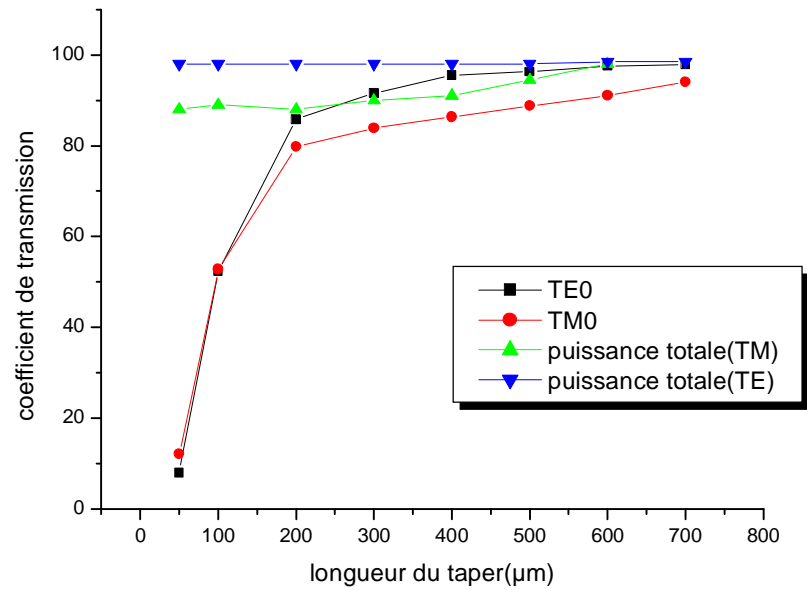
La figure III.3.5 donne l'évolution de la puissance transmise dans les modes de la transition pour différentes longueurs. Lorsqu'on injecte le mode fondamental de la fibre optique, la puissance dans les trois modes varie en fonction de l'axe de propagation  $z$ .

A l'entrée de la transition, la puissance se trouve dans le mode fondamental mais pendant la propagation, une quantité de la puissance se transfère dans les deux autres modes ; de nouveau elle se transfère dans le mode fondamental et ainsi de suite. A la sortie de la transition la puissance injectée dans le guide plan atteint une valeur constante.

\*Pour  $L=100\mu\text{m}$  les modes s'encombrent entre eux, le coefficient de transmission est de l'ordre de 98% de la puissance d'entrée, et le coefficient de transmission en mode fondamental est de l'ordre de 50.8 %.

Par contre pour  $L=200\mu\text{m}$  l'encombrement des modes diminue de sorte que la puissance dans le mode fondamental est fortement visible. De même pour  $L=600\mu\text{m}$  le mode fondamental est dominant de ce fait la puissance couplée vers les autres modes locaux de la transition devient négligeable.

Plus la longueur de la transition est longue ( $1000\mu\text{m}$ ), plus le coefficient de transmission est meilleur de l'ordre de 98.5% de la puissance d'entrée et le coefficient de transmission en mode fondamental est de l'ordre de 96.98%.



**Figure III-3-6 Le coefficient de transmission de la puissance du mode fondamental et de la puissance totale en fonction de la longueur de la transition**

La figure III-3-6 montre que la puissance est totalement concentrée dans le mode fondamental pour une longueur de transition de 600µm, au dessus de cette valeur le facteur de transmission est maintenue constant, il décroît pour les faibles longueurs de la transition en dessous de 600µm. Elle nous donne aussi la répartition de la puissance en fonction de la longueur de transition. On remarque que la puissance des modes TE atteint à la fin de la transition presque 98% de la puissance d'entrée à partir d'une longueur de 100 µm.

Pour les différentes longueurs de transition, on a visualisé l'intensité de la lumière et on a calculé le coefficient de transmission de la puissance correspondant. (Figure III-3-7)

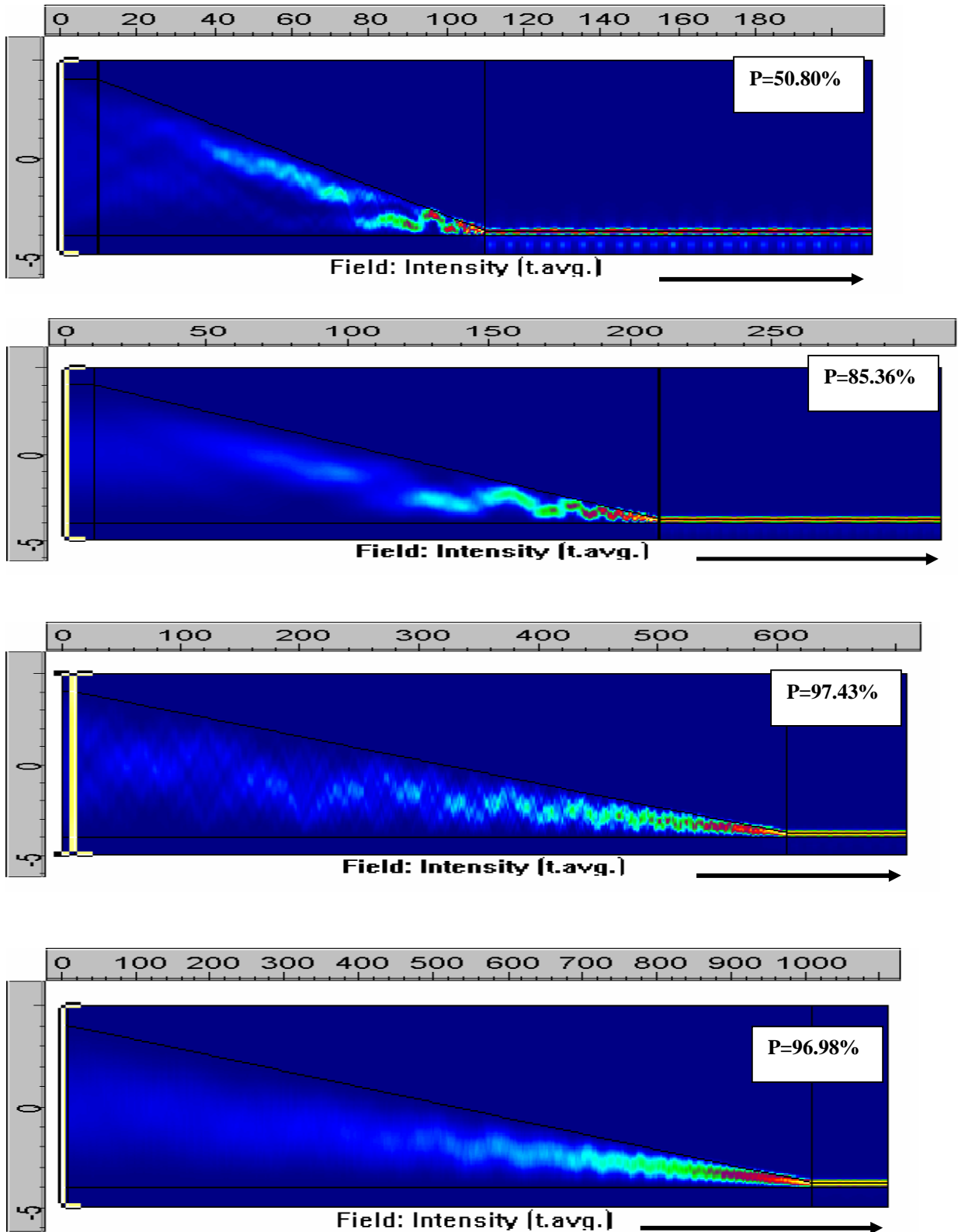


Figure III-3-7 la carte d'intensité du champ obtenu avec "FIMMPROP" pour L=100µm, L=200µm et L=600µm et L=1000 µm respectivement

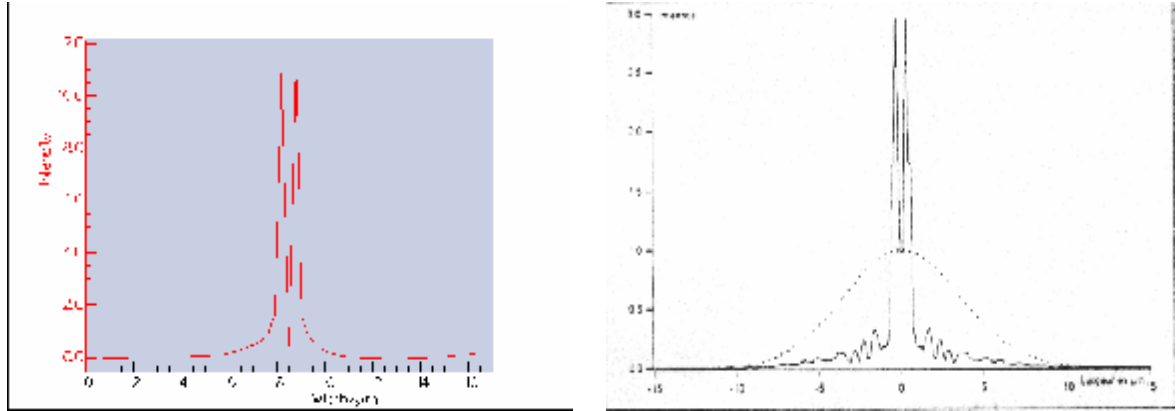
La figure III-3-7 montre que pour une longueur de  $100\mu\text{m}$  on a calculé un coefficient de transmission de l'ordre de 50.8 % de la puissance d'entrée, une perte de la lumière qui vaut 49.2%.a été observée. Par contre pour une longueur de  $600\mu\text{m}$ , on a calculé un coefficient de transmission de l'ordre de 97.43% de la puissance d'entrée : le profil du champ est proche de celui du fondamental.

On en déduit que le couplage entre une fibre optique et un guide d'onde en arête à travers une transition latérale engendre de fortes pertes puisque le profil du champ injecté est circulaire, de rayon largement supérieur à la hauteur de la transition. Les transitions de  $200\mu\text{m}$  de long sur une dizaine de microns de large semblent être un bon compromis de couplage en bout de la lumière, la seule contrainte est que cette transition est sensible à la polarisation, c'est-à-dire que le profil du champ en mode TE est différent de celui en mode TM, par conséquent elle induit de forte pertes dû au couplage. Cette étude reste très qualitative [18]. Par contre pour une transition verticale le couplage d'une fibre optique à un guide d'onde plan est une étude quantitative qui nous donne de faibles pertes mais pour des longueurs supérieures ou égales à  $600\mu\text{m}$ . La longueur optimale de la transition correspond au mode proche à celui du mode fondamental.

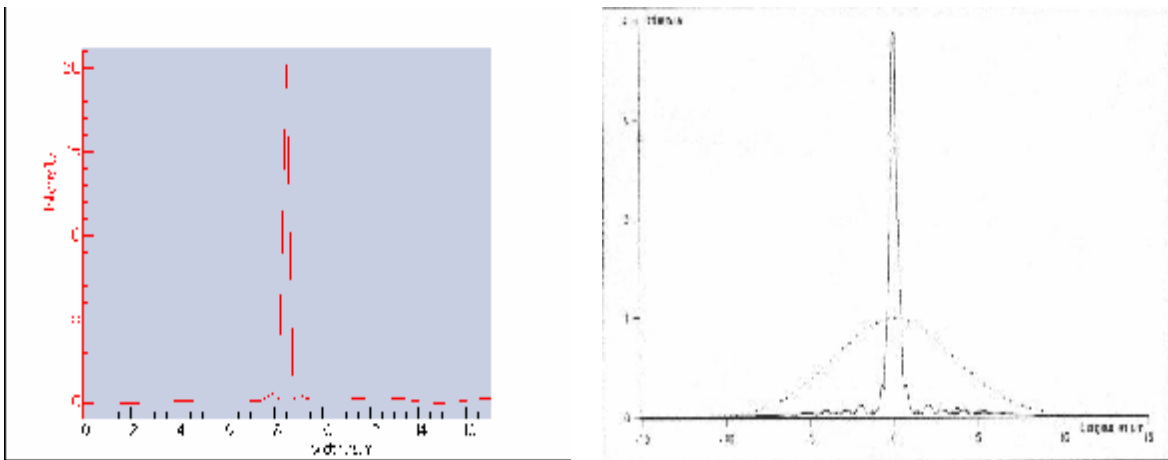
### III-4 Validation des résultats:

En comparant les courbes se rapportant à la transition latérale (figure III-2-5) à ceux obtenus à l'aide de la méthode BPM 3D [6] (figure III-4-1 et III-4-2) pour la même transition, nous pouvons constater que les deux logiciels (FIMMPROP et BPM 3D) donnent approximativement les mêmes allures de courbes. Nous constatons que pour le cas de la longueur de transition de  $400\mu\text{m}$  et en mode TM, notre logiciel donne des résultats plus précis (présence de deux pics). Pour la transition verticale et à l'aide du logiciel BPM 3D, certains chercheurs ont calculé la puissance transmise dans le mode fondamental. Ils ont obtenu un coefficient de transmission de l'ordre de 98% pour une longueur de  $1000\mu\text{m}$  [12].

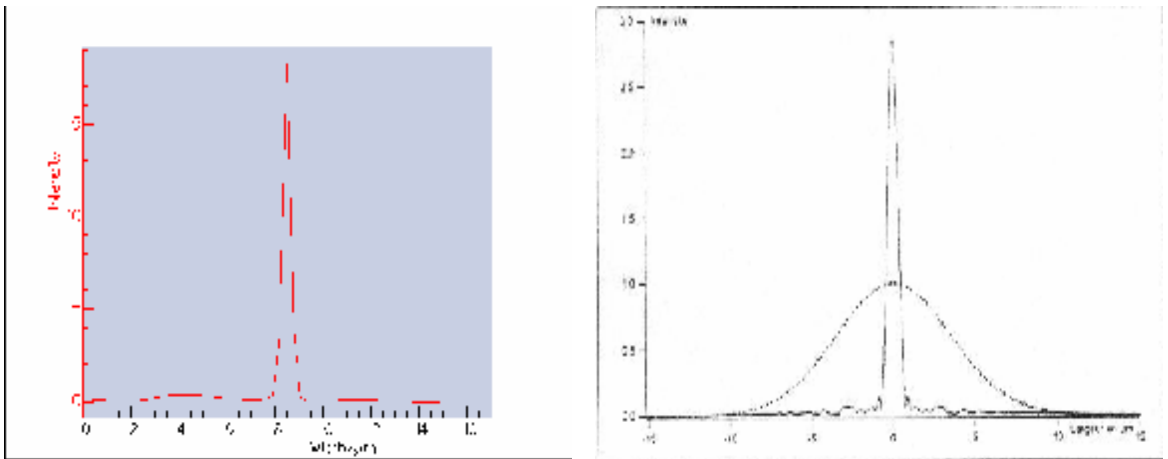
Modes TE



L=50µm



L=200µm



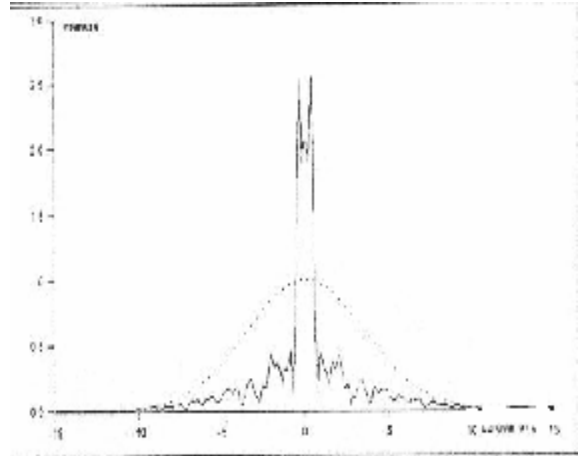
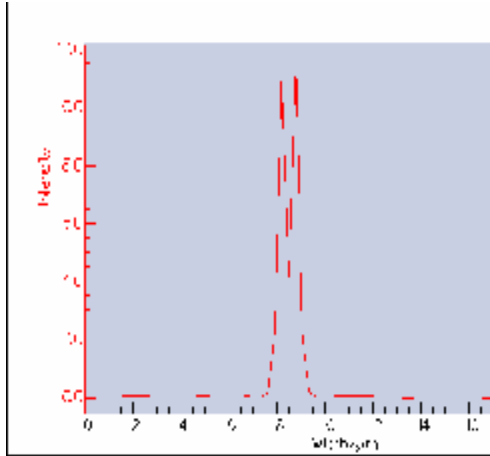
a)

b)

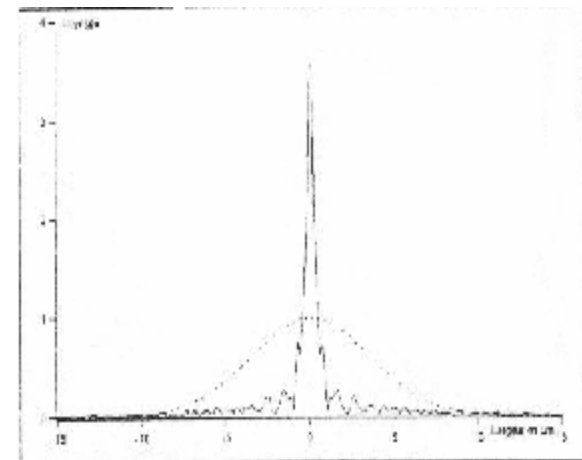
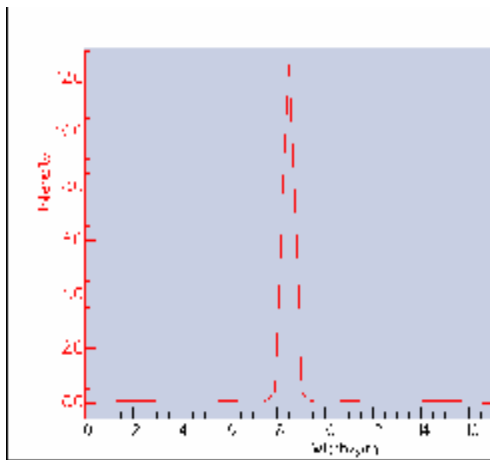
L=400µm

**Figure III-4-1 Profils des modes TE obtenus par:**  
**a) le simulateur FIMMPROP b) le logiciel BPM-3D**

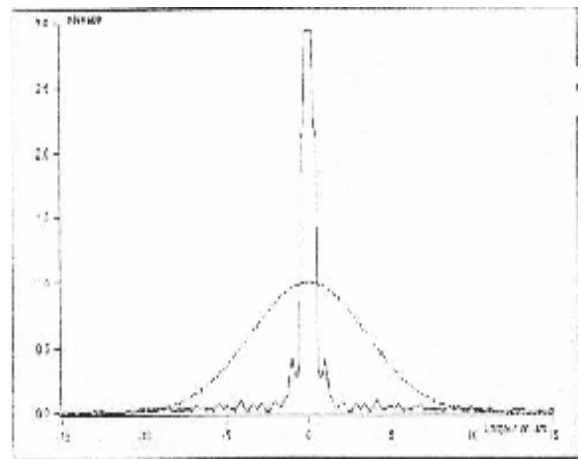
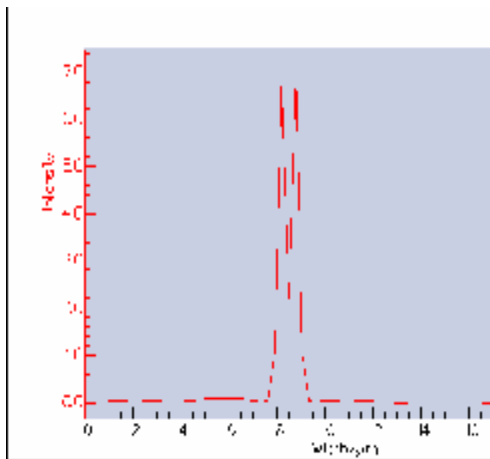
Modes TM



L=50µm



L=200µm



a)

b)

L=400µm

**Figure III-4-2 Profils des modes TM obtenus par:**  
**a) le simulateur FIMMPROP b) le logiciel BPM-3D**

# *Conclusion*

Dans le domaine des télécommunications optiques, transférer le mode fondamental provenant d'une fibre optique à un guide d'onde est une vraie problématique. C'est pourquoi, le passage de la lumière nécessite la conception des transitions entre les composants d'optiques intégrés (COI) afin de minimiser les pertes de lumière dues au couplage.

L'optimisation du modèle optoélectronique implanté dans le simulateur FIMMWAVE-FIMMPROP a montré que pour un guide d'onde plan Silicium sur Isolant (SOI) on doit choisir une épaisseur du silicium guide de  $0.25 \mu\text{m}$  et le mode  $\text{TE}_0$  pour le guidage de la lumière. Ce choix est efficace pour réaliser une structure monomode qui limite les pertes de propagation et doit être souvent compatible pour le couplage avec les fibres monomodes. Pour le même principe, les paramètres correspondants à un guide d'onde rib (SOI) monomode sont :  $W=1\mu\text{m}$   $H=1.5\mu\text{m}$ ,  $r=0.4\mu\text{m}$

Le couplage de la lumière d'une fibre optique à un guide d'onde est effectué en utilisant deux types de transition (verticale ou latérale) selon la géométrie du guide d'onde proposé (plan ou arête), il a suffit donc d'implanter le modèle dans le simulateur FIMMPROP.

Les longueurs de ces transitions doivent être choisies ni trop courtes afin de limiter les fuites de lumière, ni trop longues pour cause d'encombrement.

Dans le cas de la transition latérale, pour une longueur de  $200\mu\text{m}$  de la lumière on a calculé un coefficient de transmission de l'ordre de 87.7% de la puissance d'entrée, seulement une perte de 12.3% de la lumière a été observée.

Dans le cas de la transition verticale, nous avons calculé en mode (TE) le coefficient de transmission de la puissance du mode fondamental et de la puissance totale en fonction de la longueur de la transition, le coefficient de transmission augmente jusqu'à ce qu'il atteigne une valeur optimale pour une longueur de  $600\mu\text{m}$ , à partir de laquelle il devient constant. On a pu coupler environ 97.43% de lumière. De plus nos résultats sont en bon accord avec la littérature.

## ملخص

قد عالجتنا في هذا الموضوع أداة التعديل والتمثيل الوهمي المخصصة لدراسة مركبات بصرية ونمط الإضاءة المناسب، ويتعلق الأمر أساساً في محاولة إيجاد حل للمشكل الراهن والمتمثل في الربط الضوئي إن الربط الضوئي من ليف بصري نحو موجة أو من موجة نحو ليف بصري يشكل عائقاً تكنولوجياً حقيقياً يجب معالجته قبل البدء في التفكير في نقل أو تحويل للبنية البصرية الدقيقة على البنية أو الاتصالات البصرية نحو الصناعة.

إذن فعملنا قائم على ربط الضوء من ليف بصري أحادي الطور نحو موجة باستعمال نمطين مختلفين للنقل ( عمودي أو جازي) حسب هندسة موجة الموجة المستعمل ( مستواً ودو حصر جانبي) وهذا باستعمال برنامج FIMMPROP .

إن المكون الذي قمنا بدراسته عن طريقة تعريضه لعملية ضوئية هو السيليسيوم علي عازل من نوع SIMOX.

وقد خلصنا إلي أن شروط نشر الضوء هي جد هامة من أجل هذه البنية فالليف أحادي الطور الجيد يعتبر أكثر من ضروري من أجل الحصول علي فعالية جيدة للربط عليه فإن خصائص أو مميزات موجة الموجة المستعمل تعتبر مقاييس جد حساسة. شكل الناقل يؤثر على مردود الربط. ناقل عمودي طوله  $600\ \mu\text{m}$  يعطي 97.43% عند مدخل موجة الموجة. هذا الطول هوا لملائم للربط مع موجة الموجة المستوي.

**كلمات مفتاحية : الربط, FIMMPROP, SIMOX, ناقل عمودي, ناقل أفقي, الطور الأساسي.**



## RESUME

Dans cette thèse, nous présentons l'outil de modélisation et de simulation destiné à l'étude des composants optoélectroniques et la méthode d'optimisation appropriée, il s'agit principalement de contribuer à la résolution d'un problème actuel qui est : Le couplage optique.

Le couplage de la lumière d'une fibre optique vers un guide d'onde ou guide / fibre demeure un véritable obstacle technologique impérativement avant qu'on puisse commencer à envisager le moindre transfert vers l'industrie de la micro photonique sur la structure SOI ou des télécommunications optiques.

Notre travail, consiste donc à coupler la lumière d'une fibre optique monomode à un guide d'onde en utilisant deux types de transition (verticale ou latérale) selon la géométrie du guide d'onde utilisé (plan ou arête) à l'aide des simulateurs FIMMWAVE et FIMMPROP.

Le composant que nous avons étudié et optimisé est à base de Silicium sur isolant (SOI) type SIMOX, on a conclu que les conditions d'injection de la lumière sont déterminantes quant au fonctionnement de cette structure : Une fibre monomode est nécessaire pour obtenir une bonne efficacité de couplage et les caractéristiques du guide d'onde utilisé sont des paramètres très sensibles. La forme de la transition influe également sur le rendement de couplage. Ainsi une transition verticale de  $600\mu\text{m}$ , donne 97.43% de lumière à l'entrée du guide. Cette dernière est la plus adaptée quant au couplage avec des guides d'ondes plans.

**Mots Clés : Couplage, SIMOX, FIMMPROP, transition latérale, transition verticale, mode fondamental**

## ABSTRACT

In this thesis, we present modelling tool and simulation intended for the study of the optoelectronics components based on optimization method, it is mainly a question of contributing to the resolution of a current problem which is: optical coupling.

Coupling light from an optical fiber towards a wave guide or wave guide / fiber imperatively remains a true technological obstacle before one can start to consider the least transfer towards the industry of the micro photonic on (SOI) structure or optical telecommunications.

The purpose of this work consists in coupling the light of a singlemode optical fiber towards a wave-guide by using two kinds of taper (vertical or lateral) according to the geometry of the wave-guide used (planar or rib) using " FIMMPROP " software. The component which we studied and optimized is Silicon on insulator SIMOX type, it was concluded that the conditions of injection of the light are very significant for this structure: a good single mode fiber is necessary to obtain a good efficient coupling and the characteristics of the wave guide studied are parameters very sensitive.

**Key words: Coupling, SIMOX, FIMMPROP, lateral taper, vertical taper, fundamental mode.**

## *bibliographie*

- [1]-SEBASTIEN LARDENOIX “Distribution optique de signal d'horloge dans les circuits CMOS substrat sur isolant ”Thèse en sciences de l’université Paris XI, Orsay (2003).
- [2]-FIMMWAVE –FIMMPROP photon design, 34 Leopold Street, Oxford OX41TW, UK (1997-2002) [www.photond.com](http://www.photond.com).
- [3]-NICOLAS LANDRU “Etude de modulateurs de lumière à  $I = 1.3\mu\text{m}$  à commande électrique en optique intégrée silicium sur isolant” Thèse en sciences de l’université de VERSAILLES SAINT-QUENTIN-EN-YVELINES (30juin 2000)
- [4]-ABDELHALIM LAYADI “ Etude et caractérisation de composants d’optique intégrée sur SOI de type SIMOX” Thèse en sciences de l’université Paris XI, Orsay (Mai 1998).
- [5] BENJAMIN DUMONT. “Intégration de microguides d'ondes insensibles à la polarisation sur substrat SOI”. Rapport de stage ORSAY (18 juin-28 septembre 2001).
- [6]-EMILIE POUGEOISE “Microguides d’ondes substrat sur silicium sur isolant”, “Applications aux télécommunications optiques”, “insensibilité à la polarisation et couplage guide/fibre” rapport de stage D E A OOM ORSAY (mars/août 2002).
- [7]-R. OROBTCHOUK “ Modélisation et étude de composants pour l’optique intégrée silicium sur isolant (SIMOX) à  $\lambda=1.3\mu\text{m}$  ” Thèse en sciences de l’université Paris XI, Orsay (1996).
- [8]-SOREF, R.A, AND LORENZO, J.P “Light and light modulation in silicon on insulator waveguides, Integrated and guided waveoptics”, 1989. Tech.Dig.SeriesmOpt.Soc.Am, Washington, DC, USA, 66 FEBRUARY 1989, pp.86-89.

- [9]-SUSANNE LACROIX “notions sur les fibres optiques et leurs composants”  
[www.infotheque.info/ressource/6050.html](http://www.infotheque.info/ressource/6050.html)
- [10] Formation continue CEETAM pour ingénieurs “Composants optoélectroniques pour systèmes de transmission optique” (Novembre 2001).
- [11]-L VIVIEN. LAVAL, S. CASSAN, E. LE ROUX, X. AND D. PASCAL  
“2-D taper for low-loss coupling between polarization-insensitive microwaveguides and single mode optical fibers”. J. Lightwave Tech. VOL 21, N) 10 October 2003.
- [12]-M.B. Frish, J. FIJOL AND AL “Coupling of single mode fibers to planar Si waveguides using vertically tapered mode converters” confluent photonics Corporation, 20 New England Business Center. Andover. MA 01810 (2002)
- [13]- Ingrid Moerman, Peter P. Van DAELE and PIET M. DEMEESTER “A review on fabrication technologies for the monolithic integration of tapers with III-V semiconductor devices” IEEE journal of selected topics in quantum electronics. vol.3, N°.6, December 1997
- [14] - F. FARES “Simulation des phénomènes de propagation dans un guide d’onde rectangulaire à l’aide du logiciel "FIMMWAVE" ” Mémoire de magistère de l’université de Constantine (2003).
- [15]-Dominic F.G. Gallagher, Thomas P. Felici “Eigenmode expansion methods for simulation of optical propagation in photonics - pros and cons” Photon Design, Oxford, United Kingdom  
[www.photond.com](http://www.photond.com)
- [16]-T.P.FELICI, D.F.G.GALLAGHER “improved waveguide structures derived from new rapid optimization techniques” photonics west, sanjos., paper 4986-48 (2003)
- [17]-Katsunari Okamoto “Fundamentals of optical waveguides” Corona publishing Co, Ltd, 4-46-10 Sengoku, Bunkyo-Ku, Tokyo 112-001 (1992)

[18] M. BOUCHEMAT, T. BOUMAZA, A. LOUNIS, F. FARES, S.LAVAL, L.VIVIEN  
Simulation of lateral taper in integrated optics devices".Al-azhar engineering eighth international  
conference December 24-27,2004 .

[19] M .BOUCHEMAT, T. BOUMAZA, F. FARES, A. LOUNIS, S. LAVAL, L. VIVIEN  
"Coupling of single mode fiber to planar wave-guide using vertically tapered" international  
conference Ictis'2005 Maroc (juin 2005)