

**Titre:** Application de la technologie des matériaux sol-gel et polymère à l'optique intégrée  
Title: l'optique intégrée

**Auteur:** Zakaria Saddiki  
Author:

**Date:** 2002

**Type:** Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

**Référence:** Saddiki, Z. (2002). Application de la technologie des matériaux sol-gel et polymère à l'optique intégrée [Thèse de doctorat, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie. <https://publications.polymtl.ca/7163/>  
Citation:

## Document en libre accès dans PolyPublie Open Access document in PolyPublie

**URL de PolyPublie:** <https://publications.polymtl.ca/7163/>  
PolyPublie URL:

**Directeurs de recherche:** S. Iraj Najafi  
Advisors:

**Programme:** Non spécifié  
Program:

In compliance with the  
Canadian Privacy Legislation  
some supporting forms  
may have been removed from  
this dissertation.

While these forms may be included  
in the document page count,  
their removal does not represent  
any loss of content from the dissertation.



UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

APPLICATION DE LA TECHNOLOGIE DES MATÉRIAUX  
SOL-GEL ET POLYMÈRE À L'OPTIQUE INTÉGRÉE

ZAKARIA SADDIKI

DÉPARTEMENT DE GÉNIE PHYSIQUE  
ÉCOLE POLYTECHNIQUE

THÈSE PRÉSENTÉE EN VUE DE L'OBTENTION  
DU GRADE DE PHILOSOPHIAE DOCTOR  
(GÉNIE PHYSIQUE)

AVRIL 2002



National Library  
of Canada

Acquisitions and  
Bibliographic Services

395 Wellington Street  
Ottawa ON K1A 0N4  
Canada

Bibliothèque nationale  
du Canada

Acquisitions et  
services bibliographiques

395, rue Wellington  
Ottawa ON K1A 0N4  
Canada

*Your file* *Votre référence*

ISBN: 0-612-86449-9

*Our file* *Notre référence*

ISBN: 0-612-86449-9

The author has granted a non-exclusive licence allowing the National Library of Canada to reproduce, loan, distribute or sell copies of this thesis in microform, paper or electronic formats.

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque nationale du Canada de reproduire, prêter, distribuer ou vendre des copies de cette thèse sous la forme de microfiche/film, de reproduction sur papier ou sur format électronique.

The author retains ownership of the copyright in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur qui protège cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

# Canadä

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Cette thèse intitulée:

APPLICATION DE LA TECHNOLOGIE DES MATÉRIAUX  
SOL-GEL ET POLYMIÈRE À L'OPTIQUE INTÉGRÉE

Présentée par: SADDIKI Zakaria  
en vue de l'obtention du diplôme: Philosophiae Doctor  
a été dûment acceptée par le jury d'examen constitué de:

M. FAUCHER Guy, D.Sc., président  
M. NAJAFI Iraj S., Ph.D., membre et directeur de recherche  
M. LESSARD Roger A., D.Sc., membre  
M. GALSTIAN Tigran, Ph.D., membre

## **DÉDICACE**

À mes très chers Parents, Mohammed Saddiki et Khadija Oukrid.

À ma grand-mère Abra Rabia (Vava)

À mes frères et sœurs.

## REMERCIEMENTS

J'exprime ma reconnaissance et mes sincères remerciements à mon directeur de thèse, le professeur Iraj Najafi, pour avoir dirigé mes recherches avec patience, clairvoyance et un niveau exceptionnel de professionnalisme. Je le remercie particulièrement pour le dynamisme qu'il a si bien su me transmettre tout au long de mes travaux. Sans ses conseils, sa disponibilité et les discussions fructueuses que j'ai eues avec lui, il aurait été difficile de réaliser cette thèse. Je tiens aussi à remercier le Docteur Iraj Najafi de m'avoir accueilli au sein de son entreprise *Lumenon* où j'ai pu compléter ma thèse.

Je remercie profondément les collègues Dr. Touam Tahar, Dr. Sharam Alavian, Dr. Alireza Shooshtari et Dr. Mohammed Ghannassi. Leurs apports théoriques m'ont été indispensables, et m'ont aidé à réaliser et à comprendre la théorie, la conception, la simulation et la caractérisation des composants optiques *DWDM*.

Je remercie vivement le Docteur Mark Andrews ainsi que les Docteurs Galina Milova et Jia Zhang pour leurs efforts, leurs disponibilités et d'avoir guidé mes premiers pas de chercheur dans le domaine de la chimie du sol-gel et du polymère.

Je remercie énormément le groupe photonique de *CNRC*, de m'avoir intégré au sein du groupe pendant deux ans et de m'avoir permis de mener mes recherches à terme.

Je tiens à remercier Madame Margaret Buchanan, du groupe *INMS* du *CNRC* à Ottawa, de m'avoir permis d'utiliser la salle propre et les équipements de caractérisations et de mesures.

J'adresse un sincère merci à tous les membres du groupe photonique de l'École Polytechnique de Montréal pour m'avoir accueilli et intégré parmi eux.

Mes fraternels remerciements vont aussi à tout membre de notre groupe de recherche. Que toutes celles et tous ceux qui ont été mes camarades pendant près de cinq ans, et plus particulièrement, celles et ceux avec qui j'ai partagé des projets, soient remerciés pour la bonne ambiance qu'ils ont su créer.

## RÉSUMÉ

Avec l'avancement des systèmes de télécommunication, les technologies de l'optique intégrée et de l'interconnexion optique deviennent de plus en plus importantes. Les composants principaux de ces deux dernières technologies sont les circuits photoniques intégrés (PICs), les circuits optoélectroniques intégrés (OEICs) et des modules de multi-composants optoélectroniques (multichip module) (OE-MCMs). Les signaux optiques sont transmis à travers des guides d'ondes optiques qui interconnectent différents composants optoélectroniques.

Une grande variété de matériaux optiques, comme le verre, le niobate de lithium, les semi-conducteurs *III-V* et les polymères a été étudiée, tels que des composants optiques passifs ont été fabriqués par différentes technologies telles que l'échange ionique, le dépôt par hydrolyse à la flamme (*FHD*) et la gravure ionique réactive (*RIE*). Dans le cas des guides d'ondes à base de la silice, tous les composants passifs doivent être formés sur le même substrat avant de les interconnecter avec d'autres composants (passifs optoélectroniques) à cause de la haute température de consolidation de la silice, qui est de l'ordre de  $1300\text{ }^{\circ}\text{C}$  lors de *FHD* et *RIE*. À cette contrainte s'ajoute la non-flexibilité des deux technologies: *FHD* et *DIE*. Ce qui rend ces dernières incapables de satisfaire à la demande croissante du marché de télécommunication.

Le domaine de l'optique intégrée fait l'objet actuellement de recherches intenses et très prometteuses, notamment dans le domaine des télécommunications et du traitement optique du signal (modulateurs, amplificateurs, micro-lasers, multiplexeurs, commutateurs, etc...). Il tend à miniaturiser tout système, en intégrant un grand nombre d'éléments de fonction différents dans un espace restreint. Après le succès connu par les

circuits intégrés en électronique, de grands efforts ont été déployés pour développer des circuits optiques à base de couches minces. En raison de l'importance de ce projet, nous en avons fait le but majeur de notre thèse, afin de réduire les problèmes d'alignement et d'encombrement généralement rencontrés en optique classique. Nous nous sommes particulièrement intéressé au verre de sol-gel hybride, qui est un diélectrique organique-inorganique issu d'un processus à faible température. C'est un matériau qui peut arborer différents comportements selon les proportions relatives de ses constituants organiques-inorganiques. De ces différentes compositions résultent différentes propriétés qui peuvent aller d'un extrême quasi-organique (polymère) jusqu'à son antipode quasi-inorganique (verre). Entre ces deux lieux, existe donc la région de multi-fonctionnalités où, dépendant de la composition, divers comportements se côtoient, c'est donc une région d'adaptabilité des propriétés à différents problèmes rencontrés en photoniques. En somme, ces caractéristiques assurent une flexibilité certaine au matériau.

Nous nous proposons de contribuer d'une manière significative à la recherche et au développement des matériaux sol-gel et polymère destinés aux applications photoniques, qui sont devenues des domaines très actifs, malgré le fait que la science des matériaux photonique soit relativement nouvelle. Les objectifs de notre recherche comprennent les éléments suivant:

- a) découvrir plusieurs nouveaux matériaux;
- b) développer des matériaux en améliorant leurs propriétés optiques et mécaniques;
- c) rendre la technologie des matériaux plus flexible;
- d) satisfaire à la demande de plus en plus exigeante du marché des télécommunications.

Ce sont les pertes optiques des composants qui limitent la performance d'un système de composants optiques. Ces pertes proviennent d'imperfections liées aux propriétés optiques intrinsèques du matériau et au mode d'élaboration des composants: la conception, la micro-fabrication et l'interconnexion des composants. Pour remédier à

ceste situation, nous avons élaboré plusieurs stratégies pour minimiser les pertes des matériaux en agissant sur leur composition, sur leurs propriétés chimiques et sur leur mode d'élaboration. Nous sommes parvenus en même temps à optimiser la conception et la micro-fabrication des composants optiques ainsi qu'à minimiser les pertes d'interconnections entre fibres et composants optiques.

Les grandes lignes de la méthodologie que nous avons adoptée pour étudier et évaluer le potentiel des matériaux pour les applications photoniques sont les suivantes:

- (i) Le choix des matériaux sol-gel et polymère selon leur degré de transparence dans les deux fenêtres optiques 1.3 et 1.5  $\mu\text{m}$  et leurs propriétés chimiques, physiques et thermo-optiques.
- (ii) La caractérisation optique des guides d'ondes plans à la base des matériaux choisis dans (i). Elle repose sur l'étude, selon différents procédés et traitements, de l'indice de réfraction, de la biréfringence et des propriétés thermo-optiques des couches minces.
- (iii) L'optimisation du procédé de la micro-fabrication en vue d'obtenir une bonne résolution et une meilleure gravure chimique en profondeur entre deux guides d'ondes adjacents très proches (*Aspect Ratio*).
- (iv) La conception, en tenant compte des habiletés du procédé de micro-fabrication optimisé, des composants optiques *DWDM*.
- (v) La micro-fabrication et la caractérisation optique des différents composants optiques *DWDM*.

Nos résultats, obtenus par la méthode du prisme coupleur intégré à un contrôleur de température Peltier, montrent que le traitement des couches minces à base du sol-gel et des polymères, qu'il soit à la lumière ultra-violet ou thermique ou même une combinaison des deux, agit directement sur les propriétés optiques de ces dernières. En effet, l'indice de réfraction et la biréfringence des couches minces du sol-gel et polymère

sont fonctions des traitements subis par la couche mince, d'où la possibilité de contrôler et d'ajuster les propriétés optiques d'une couche mince sol-gel et polymère en contrôlant les traitements thermiques et ultra-violets. Nous avons effectivement réussi à éliminer la biréfringence du matériau sol-gel aluminium phosphate en combinant les deux traitements.

Puisque les propriétés chimiques varient selon le matériau utilisé, nous avons développé des processus de micro-fabrications et surtout des critères dans le choix du solvant pour dissoudre la poudre du matériau ainsi que le choix du solvant pour la gravure chimique humide en tenant compte de la nature chimique de chaque matériau. Nous avons, après optimisation du procédé de micro-fabrication, obtenu des guides d'ondes en relief quasi-parfaits: la forme géométrique et rectangulaire, les côtés (*side wall*) verticaux du guide sont quasiment perpendiculaires au substrat et la rugosité des surfaces du guide est inférieure à  $10 \text{ nm}$ . Nous avons réussi à obtenir de bonnes résolutions d'impression, c'est-à-dire un bon *AR* (*aspect ratio*). Aussi, nous avons réussi à graver complètement la région non exposée à la lumière ultra-violette entre deux guides adjacents distant de  $4 \text{ } \mu\text{m}$  à l'aide de la technique de gravure chimique humide.

Après avoir identifié les paramètres de la micro-fabrication en terme de la résolution, la dimension, l'*AR* ainsi que le choix et le traitement de la couche tampon et le choix et le traitement de la couche gain, nous avons conçu, fabriqué et caractérisé optiquement des composants optiques passifs *DWDM*, *16x16* et *1x8* (*100* et *200 GHz*) destinés au marché de la télécommunication.

Dans le but d'améliorer les performances optiques des composants optiques *DWDM*, nous avons réalisé, par conception et micro-fabrication, des composants *DWDM* mono-mode qui disposent de bonnes performances optiques. D'abord, la perte d'insertion moyenne des différents canaux est inférieure à  $7 \text{ dB}$ , ensuite la diaphonie moyenne est

supérieure à  $-20\ dB$  et enfin la perte due à la polarisation est inférieure à  $0.7\ dB$ . Nous avons aussi étudié et soulevé l'importance des pertes de couplage des guides d'ondes rectangulaires avec une fibre mono-mode.

L'analyse des résultats de la caractérisation des propriétés thermo-optiques des différentes couches - le substrat, la couche tampon, la couche guide, et la couche gaine – qui composent l'élément *DWDM*, nous a permis de concevoir et de fabriquer une structure *DWDM tout polymère (all polymer)* insensible à la température et dont la perte due à la polarisation est réduite comparativement à celle de la structure *DWDM* avec un substrat de Silicium.

## ABSTRACT

With the advancement of optical telecommunication systems, "integrated optics" and "optical interconnect" technology are becoming more and more important. The major components of these two technologies are photonic integrated circuits (*PICs*), optoelectronic integrated circuits (*OEICs*), and optoelectronic multichip modules (*OE-MCMs*). Optical signals are transmitted through optical waveguides that interconnect such components. The principle of optical transmission in waveguides is the same as that in optical fibres. To implement these technologies, both passive and active optical devices are needed. A wide variety of optical materials has been studied, e.g., glasses, lithium niobate, III-V semiconductors, sol-gel and polymers. In particular, passive optical components have been fabricated using glass optical waveguides by ion-exchange, or by flame hydrolysis deposition and reactive ion etching (*FHD* and *RIE*). When using *FHD* and *RIE*, a very high temperatures (up to  $1300\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) are needed to consolidate silica. In addition, the inflexibility of glass waveguides and the difficulty of processing large waveguides make it difficult to achieve *PICs* and *OEICs*, or *OE-MCMs* after attaching or forming of optical and electronic components.

This work reports on the fabrication and characterization of a new photo-patternable hybrid organic-inorganic glass sol-gel and polymer materials for the realisation of integrated optic and opto-electronic devices. They exhibit low losses in the *NIR* range, especially at the most important wavelengths windows for optical communications ( $1320\text{ nm}$  and  $1550\text{ nm}$ ).

The sol-gel and polymer process is based on photo polymerization and thermo polymerization effects to create the wave-guide. The single-layer film is at low

temperature and deep UV-light is employed to make the wave-guide by means of the well-known photolithography process. Like any photo-imaging process, the UV energy should exceed the threshold energy of chemical bonds in the photoactive component of hybrid glass material to form the expected integrated optic pattern with excellent line width control and vertical sidewalls. To achieve optical wave-guide, a refractive index difference  $\Delta n$  occurred between the isolated (guiding layer) and the surrounding region (buffer and cladding). Accordingly, the refractive index emerges as a fundamental device performance material parameter and it is investigated using slab wave-guide.

By means of prism coupling method we investigate the refractive index variation and propagation losses on slab wave-guide. Films were coated by spinning or dipping on silicon substrate, which had  $2.4 \mu m$  thermally grown  $SiO_2$  layer on their surface. A pre-bake (temperature and time), an UV-light insulation (power and time) and a post-bake (temperature and time) follow to make slab wave-guide according to the ridge wave guides micro-fabrication process, the dependence of refractive index versus different UV and baking treatments is evaluated for different materials (sol-gel and polymer material).

The micro-fabrication control of the surface, buried or ridge wave-guide lead to ensure photonics device performance. Hence we fabricate and characterize a slab and ridge waveguides by conventional photolithography: ultraviolet light imprinting on sol-gel and polymer thin films deposited by one-step spin or dip-coating process. We demonstrate that the adjustment of chemical composition of the materials provides precise selection of refractive index. The refractive index of the waveguides is close to that of optical fibre, thus reducing the coupling loss between the two. The effect of ultraviolet light exposure and heat treatment on slab waveguide refractive index is studied. Micro-fabrication parameters, chemical composition and densification process are optimized to produce ridge waveguides with, high resolution, vertical and smooth sidewall and very high aspect ratio ( $AR$ ).

Based on the characterization data from optimized process, we design and fabricate a dense wavelength division multiplexing (*DWDM*) based on an arrayed wave guide grating (*AWG*). We report the measured optical performance of an integrated  $N \times N$  multiplexer (100 GHz and 200 GHz). The insertion loss for  $N = 8$  is typically lower than 6 dB, the cross talk is less than  $-20$  dB and the polarization dependence loss (*PDL*) is less than 0.2 dB.

By properly adjusting the coefficient of thermal expansion of the polymers used like substrate, buffer, athermal and polarization-independent *AWG* devices featuring a wave length shift of less than 0.08 nm in the 25 - 70 °C temperature range are successfully designed, fabricated and tested.

A single mode *DWDM* device with optimized bending radius and processes are designed, fabricated and tested. The purpose behind this study is to improve optical response in terms of insertion loss and cross talk.

Finally, the coupling loss between single mode and rectangular wave guide have been deeply studied. It has demonstrated that the measured data match very well with calculated results.

**TABLE DES MATIÈRES**

<b>DÉDICACE</b> .....	<b>iv</b>
<b>REMERCIEMENTS</b> .....	<b>v</b>
<b>RÉSUMÉ</b> .....	<b>vii</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>xii</b>
<b>TABLE DES MATIÈRES</b> .....	<b>xv</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX</b> .....	<b>xx</b>
<b>LISTE DES FIGURES</b> .....	<b>xxii</b>
<b>LISTE DES ANNEXES</b> .....	<b>xxx</b>
<b>INTRODUCTION GÉNÉRALE</b> .....	<b>1</b>
<b>CHAPITRE I. SYNTHÈSE DU SOL-GEL ORGANIQUE- INORGANIQUE ET POLYMÈRES POUR MATÉRIAUX OPTIQUES</b> .....	<b>8</b>
I.1 Sol-gel organique-inorganique .....	8
I.1.1 Introduction.....	8
I.1.2 Avantages du sol-gel.....	10
I.1.3 Génie moléculaire des métaux alkoxides.....	11

I.1.4	Spectre d'absorption de sol-gel organique inorganique à Zirconium et à Aluminium .....	14
I.2	Les polymères .....	16
I.2.1	Synthèse des macromolécules par polymérisation radicalaire.....	16
I.2.2	Copolymérisation radicalaire .....	18
I.2.3	La transition vitreuse.....	19
I.3	Mécanismes réactionnels de réticulation des matériaux polymères utilisés 20	20
I.3.1	Matériaux ter-polymère <i>SFG</i> associé au guide .....	20
I.3.2	Matériaux co-polymère des couches tampon et gaine .....	23
I.4	Conclusion .....	24

## CHAPITRE II. CARACTÉRISATION DU SOL-GEL

### ORGANOALUMINOPHOSPHATE..... 26

II.1	Introduction.....	26
II.2	Synthèse et fabrication.....	27
II.3	Résultats et discussions.....	29
II.3.1	L'effet de l'exposition à la lumière UV .....	30
II.3.2	Effets dûs au vieillissement .....	31
II.3.3	Combinaison des effets de la température de cuisson et d'une exposition à la lumière ultra-violette.....	32
II.3.4	Biréfringence.....	34
II.4	Conclusion .....	36

## CHAPITRE III. THÉORIE DU RÉSEAU SÉLECTIF PLANAIRES (*AWG*) 37

III.1	Présentation du réseau sélectif planaire <i>AWG</i> .....	37
III.2	Procédure conceptuelle d'un <i>AWG</i> .....	42
III.2.1	Les paramètres du matériau .....	42
III.2.2	Paramètres spécifiques du composant <i>AWG</i> .....	42

III.2.3	Paramètres de conception .....	43
III.3	Étapes de conception .....	43
III.3.1	Dimensions des guides canaux .....	43
III.3.2	Ordre du réseau ( $m$ ) .....	44
III.3.3	Longueur de guide plan en étoile ( $R$ ) .....	45
III.3.4	Longueur d'incrémentation ( $\Delta L$ ) .....	45
III.4	Simulation.....	45

## **CHAPITRE IV. LA FABRICATION PHOTOLITOGRAPHIQUE DES GUIDES D'ONDES EN RELIEF ET DE STRUCTURE *DWDM*..... 52**

IV.1	Introduction.....	52
IV.2	Guide d'ondes en relief.....	54
IV.2.1	Étapes de la microfabrication d'un guide en relief .....	54
IV.3	Méthode simple pour évaluer un solvant pour l'étape de développement en microfabrication.....	62
IV.3.1	Contexte et objectifs .....	62
IV.3.2	Section expérimentale:.....	64
IV.3.3	Résultats et discussion: .....	64
IV.3.4	Conclusion .....	68
IV.4	Effets du choix de la couche tampon et de la couche de gaine sur les performances optiques de composant <i>DWDM 16x16</i> .....	68
IV.4.1	Introduction.....	68
IV.4.2	Expérience.....	69
IV.4.3	Résultats.....	69
IV.4.4	Conclusion .....	72

<b>CHAPITRE V. ÉTUDE DES PROPRIÉTÉS THERMO-OPTIQUES DES MÉTÉRIAUX SOL-GEL ORGANIQUE-INORGANIQUE ET POLYMIÈRES.....</b>	<b>73</b>
V.1 Matériaux sol-gel .....	73
V.1.1 Résumé.....	73
V.1.2 Introduction.....	74
V.1.3 Synthèse et fabrication.....	76
V.1.4 Résultats et caractérisation.....	77
V.1.5 Conclusion .....	85
V.2 Matériaux Polymères .....	86
V.2.1 Indice de réfraction et biréfringence d'un film déposé sur un substrat de Silicium.....	86
V.2.2 Indice de réfraction et biréfringence des structures complexes.....	92
V.2.3 Effet de la température sur la perte de propagation .....	95
V.2.4 Composants AWG- insensibles à la température.....	97
V.2.5 Conclusion .....	104
<b>CHAPITRE VI. CONCEPTION ET FABRICATION DE COMPOSANT DWDM MONO-MODE.....</b>	<b>105</b>
VI.1 Introduction.....	105
VI.2 Expérience .....	105
VI.3 Résultats.....	107
VI.3.1 Mesure de pertes de courbure .....	107
VI.3.2 Mesure de perte de couplage.....	111
VI.3.3 Mesure des Pertes de propagation.....	112
VI.3.4 Résultats des <i>DWDM</i> .....	113
VI.4 Discussion .....	118
VI.4.1 Comparaison des procédés A et B .....	118

VI.4.2	Comment améliorer les performances des composants DWDM.....	118
VI.5	Conclusion .....	120
<b>CHAPITRE VII. PERTE DE COUPLAGE ENTRE FIBRE MONO-MODE</b>		
<b>ET GUIDE D'ONDE RECTANGULAIRE .....</b>		<b>121</b>
VII.1	Résultats.....	122
VII.2	Le chevauchement de profil des Modes. .....	122
VII.2.1	Description.....	122
VII.2.2	Les résultats expérimentaux.....	125
VII.3	Nombre de modes dans un guide d'onde.....	127
VII.4	Désalignement latéral et angulaire.....	129
VII.4.1	Désalignement latéral.....	129
VII.4.2	Désalignement angulaire.....	131
VII.5	Distance entre la fibre et le guide d'onde .....	133
VII.6	L'effet de réflexion de Fresnel.....	136
VII.7	Effet d'interférence.....	139
VII.8	Effet des pertes de couplage dans les mesures optiques des DWDM. ....	144
VII.8.1	L'alignement avec une fibre. ....	144
VII.8.2	Alignement avec un bloc de fibre .....	144
<b>CONCLUSION .....</b>		<b>146</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE.....</b>		<b>152</b>

## LISTE DES TABLEAUX

<b>Tableau II-1 :</b> Les paramètres de fabrication des guides d'ondes plans et les résultats de la caractérisation. ....	33
<b>Tableau IV-1 :</b> Les conditions d'expérience de la courbe de développement de ter-polymère. ....	58
<b>Tableau IV-2 :</b> Résultats en terme de réponse optique des différents <i>DWDM</i> de la première expérience. ....	70
<b>Tableau IV-3.:</b> Résultats de l'expérience 2 en terme de réponse optique des différents <i>DWDM</i> (200 GHz). ....	71
<b>Tableau IV-4 :</b> Résultats en terme de réponses optiques des différents <i>DWDM</i> (100 GHz) de l'expérience 3. ....	71
<b>Tableau V-1 :</b> Les paramètres de fabrication des films (guides d'onde plans ). ....	80
<b>Tableau V-2 :</b> Coefficient thermo-optique $(dn/dT)_{TE}$ , $(dn/dT)_{TM}$ , la température dont la biréfringence est zéro et le coefficient d'expansion thermo-optique $\alpha_{TE}$ . ....	80
<b>Tableau V-3 :</b> Paramètres de fabrication des films (guides d'onde plans ) et les résultats de caractérisation, $dn/dT$ et $\alpha$ sont mesurés pour la polarisation <i>TE</i> .....	85
<b>Tableau V-4 :</b> Résultats de mesure de l'indice de réfraction et de la biréfringence de la couche guidant ter-polymère ( <i>SFG</i> ) et de la couche tampon co-polymère ( <i>BG</i> ). ....	93
<b>Tableau VI-1 :</b> Paramètres des guides d'ondes des échantillons fabriqués et testés....	109
<b>Tableau VI-2 :</b> Perte de couplage mesurée sur les échantillons de type A. ....	112
<b>Tableau VI-3 :</b> Fluctuation et uniformité de la perte d'insertion dans deux guide canaux droits et un guide courbé. La réponse optique est présentée dans la <b>Figure VI-7</b> .	113
<b>Tableau VI-4 :</b> Résultants de la mesure de la <i>PDL</i> dans le guide canal central dont la réponse optique est montré dans la <b>Figure VI-8</b> . ....	114
<b>Tableau VI-5 :</b> Résumé des résultats des <i>DWDM</i> testés. ....	117

<b>Tableau VI-6</b> : Contributions des différentes sources de perte dans un <i>DWDM</i> fabriqué avec le matériel green ( $0.8 \text{ dB/cm}$ ) et selon le procédé actuel. ....	119
<b>Tableau VI-7</b> : Contribution des différentes sources de perte dans un DWDM fabriqué avec un matériel ayant $0.6 \text{ dB/cm}$ comme perte de propagation.....	119
<b>Tableau B-1</b> : Exemple de Spécification d'un dispositif <i>DWDM</i> .....	182

## LISTE DES FIGURES

<b>Figure I-1</b> : Les étapes de fabrication de la solution sol-gel .....	14
<b>Figure I-2</b> : Spectre d'absorption <i>NIR</i> du sol-gel à base du zirconium, <i>MAPTMS/Zr/MAA 10/3/3</i> .....	15
<b>Figure I-3</b> : Spectre d'absorption <i>NIR</i> du sol-gel à base d'aluminium, <i>MAPTMS / BATES (aluminium) 85/15</i> .....	15
<b>Figure I-4</b> : Exemple de mécanisme réactionnel intervenant trois étapes: Initiation, propagation et terminaison.....	17
<b>Figure I-5</b> : Mécanisme réactionnel de réticulation de ter-polymère <i>SFG</i> .....	21
<b>Figure I-6</b> : Spectre d'absorption <i>NIR</i> de ter-polymère <i>SFG</i> .....	21
<b>Figure I-7</b> : Mesure des pertes de propagations, par la méthode de <i>cut-back</i> , dans un guide d'onde carré ( $6.3 \times 6.3 \mu\text{m}^2$ ), <i>SFG</i> , à $1.5 \mu\text{m}$ .....	22
<b>Figure I-8</b> : Mesure des pertes de propagations, par la méthode de <i>cut-back</i> , dans un guide d'onde carré ( $6 \times 6 \mu\text{m}^2$ ) <i>SFG</i> . Chaque point correspond à la moyenne des pertes dans l'intervalle de longueur d'onde $1290-1310 \text{ nm}$ .....	23
<b>Figure I-9</b> : Mécanisme réactionnel de réticulation de co-polymère <i>BG</i> .....	24
<b>Figure II-1</b> : les étapes de fabrication d'un guide d'ondes plan. ....	29
<b>Figure II-2</b> : Variation de l'épaisseur de la couche mince de verre à sol-gel avec la vitesse de tirage.....	30
<b>Figure II-3</b> : Augmentation de l'indice de réfraction, $\Delta n$ , dans le film sol-gel en fonction du temps d'exposition à la lumière UV.....	31
<b>Figure II-4</b> : Variation de l'épaisseur du film avec l'âge de sol. $V$ est la vitesse de tirage. ....	32
<b>Figure II-5</b> : Augmentation de l'indice de réfraction, $\Delta n$ , en fonction de la température de post-recuit Les films ont été exposés à la lumière UV pendant une heure. ....	34

<b>Figure II-6 :</b> Variation de l'indice effectif du mode fondamental et du mode du premier ordre en fonction du temps d'exposition à la lumière UV. Les films ont été recuits à $160^{\circ}\text{C}$ pendant 1h.....	35
<b>Figure II-7 :</b> Variation de l'indice effectif du mode fondamental et du mode du premier ordre en fonction du temps d'exposition à la lumière UV. Les films ont été recuits à $130^{\circ}\text{C}$ pendant 1h.....	35
<b>Figure III-1 :</b> Schéma du phénomène d'interférence lorsque la lumière cohérente traverse deux fentes séparées par une distance $d$ et que le front d'onde de fait un angle $\eta$ avec le plan des deux fentes.....	38
<b>Figure III-2 :</b> schéma de l'interférence dans la région du coupleur en étoile ( <i>Slab</i> ). Le plan image et le plan des fentes sont deux cercles dont le centre de l'un est localisé sur la circonférence de l'autre.....	41
<b>Figure III-3 :</b> Les paramètres géométriques du deuxième guide d'onde plan en étoile ( <i>second slab region</i> ).....	46
<b>Figure III-4 :</b> la simulation d'un Demultiplexeur <i>1x16 AWG</i> avec un espacement de $0.8\text{ nm}$ entre deux canaux adjacents et $1547.15\text{ nm}$ comme longueur d'onde correspondant au guide canal central.....	51
<b>Figure III-5:</b> La réponse optique expérimental d'un Demultiplexeur <i>1x16 AWG</i> avec un espacement de $0.8\text{ nm}$ entre deux canaux adjacents et $1547.15\text{ nm}$ comme longueur d'onde théorique correspondant au guide canal central.....	51
<b>Figure IV-1 :</b> Impression d'un guide canal sur un film photosensitif par exposition aux UV à travers d'un masque photolithographique.....	52
<b>Figure IV-2 :</b> Les étapes de la microfabrication d'un guide d'ondes en relief.....	53
<b>Figure IV-3 :</b> La variation de l'épaisseur de film de sol-gel organique-inorganique 20 % Zirconium en fonction de la viscosité de la solution et de la vitesse de tirage.....	55
<b>Figure IV-4 :</b> (1) Représente la courbe de développement de ter-polymère selon le procédé (b) décrit dans le tableau IV-1 et (2) représente la partie linéaire de la courbe de développement (1).....	57

<b>Figure IV-5</b> : Paramètres physiques, L1, L2, L3 et D, qui déterminent les dimensions et la forme géométrique du guide en relief.....	58
<b>Figure IV-6</b> : Dépendance des dimensions et de la forme du guide en fonction du temps d'exposition à l'UV. a): ouverture du masque = $5\text{ }\mu\text{m}$ et b): ouverture du masque = $10\text{ }\mu\text{m}$ .....	59
<b>Figure IV-7</b> : La sortie d'un coupleur en étoile d'un DWDM après la gravure chimique humide montrant la difficulté de nettoyer en profondeur entre les guides.....	60
<b>Figure IV-8</b> : Photos SEM ( microscope électronique à balayage) des guides d'ondes en relief d'un sol-gel 15 % Al exposé durant trois minutes à travers une ouverture de masque de $10\text{ }\mu\text{m}$ , $7\text{ }\mu\text{m}$ et $5\text{ }\mu\text{m}$ pour les photos 1, 2 et 3 respectivement. ....	61
<b>Figure IV-9</b> : Photo SEM de la région de sortie du guide d'onde en étoile d'un DWDM. ....	62
<b>Figure IV-10</b> : Profil de la couche mince de co-polymère dont une région (de 0 à 2,3 mm) a été exposée au pentanedione.....	65
<b>Figure IV-11</b> : Variation de l'épaisseur en fonction du temps de la couche mince de co-polymère exposée au solvant. ....	66
<b>Figure IV-12</b> : Variation de l'épaisseur en fonction du temps de la couche mince de co-polymère exposée par un solvant.....	67
<b>Figure IV-13</b> : Expansion de la couche mince du co-polymère (à $t = 0$ ) en fonction de la concentration de pentanedione. La courbe dans la figure est tout simplement une aide visuelle. ....	67
<b>Figure V-1</b> : Variation de l'indice de réfraction ( $n_{TE}$ , $n_{TM}$ ) des films à base de $\text{ZrO}_2$ (22%) en fonction du temps d'exposition à l'UV.....	78
<b>Figure V-2</b> : La variation de la biréfringence en fonction du temps d'exposition.....	79
<b>Figure V-3</b> : Variation de l'indice de réfraction en fonction de la température pour les échantillons 1, 2 et 3. ....	80
<b>Figure V-4</b> : Variation de l'indice de réfraction en fonction de la température pour les échantillons 1, 2 et 3. ....	82

<b>Figure V-5 :</b> Variation de la biréfringence en fonction de la température.....	83
<b>Figure V-6 :</b> Variation thermique de la fonction $f_{LL} = (n^2+2)/(n^2-1)$ pour les échantillons 1, 2 et 3.....	84
<b>Figure V-7 :</b> Film déposé sur un substrat de silicium.....	87
<b>Figure V-8 :</b> La variation de l'indice de réfraction à 632 nm en fonction de la température ( $T < 200 ^\circ C$ ) dans la couche tampon de copolymère <i>BG</i> .....	88
<b>Figure V-9 :</b> Variation de la biréfringence du film co-polymère <i>BG</i> de 6.5 $\mu m$ en fonction de la longueur d'onde.....	88
<b>Figure V-10 :</b> Variation de l'indice de réfraction à 632 nm en fonction de la température ( $T < 200 ^\circ C$ ) dans la couche guidant du ter-polymère <i>SFG</i> .....	90
<b>Figure V-11 :</b> Variation de l'épaisseur en fonction de la température ( $T < 200 ^\circ C$ ) dans la couche guidante du ter-polymère <i>SFG</i> .....	90
<b>Figure V-12 :</b> Variation de la biréfringence de la couche guidante du ter-polymère <i>SFG</i> de 6.5 $\mu m$ d'épaisseur en fonction de la longueur d'onde.....	91
<b>Figure V-13 :</b> Mesure de <i>TGA</i> pour le ter-polymère <i>SFG</i> .....	92
<b>Figure V-14 :</b> Schéma de la structure couche guidante /couche tampon /substrat de silicium.....	93
<b>Figure V-15 :</b> Biréfringence ( $n_{TM}-n_{TE}=dn$ ) de la couche guidante ter polymère ( <i>SFG</i> ) en fonction de la température.....	94
<b>Figure V-16 :</b> Différence de l'indice de réfraction ( $\lambda=1.5\mu m$ ) entre la couche guidant ( <i>SFG</i> ) et la couche tampon du copolymère ( <i>BG</i> ) en fonction de la température.....	94
<b>Figure V-17 :</b> Biréfringence ( $n_{TM}-n_{TE}=dn$ ) de la couche tampon copolymère ( <i>BG</i> ) en fonction de la température.....	95
<b>Figure V-18 :</b> Atténuation de l'intensité de la lumière ( $\lambda=1.5\mu m$ ) le long du guide d'ondes plan du copolymère <i>BG</i> en fonction de la température.....	96
<b>Figure V-19 :</b> Atténuation de l'intensité de la lumière ( $\lambda=1.5\mu m$ ) le long du guide d'ondes plan du ter-polymère <i>SFG</i> en fonction de la température.....	96

<b>Figure V-20</b> : Schéma de la structure Tout polymère (b) et de structure avec substrat de silicium (a) .....	98
<b>Figure V-21</b> : Décalage ( <i>shift</i> ) de la longueur d'onde en fonction de la température dans le cas d'un AWG avec substrat de silicium. ....	100
<b>Figure V-22</b> : Décalage de la longueur d'onde en fonction de la température dans le cas d'un <i>AWG</i> tout polymère. ....	100
<b>Figure V-23</b> : Effet du choix du substrat sur la réponse optique dans les conditions normales du laboratoire (courbes plaines) et à 70 °C ( courbes discontinues) d'un <i>CWDM</i> (1x4 20 nm), fabriqué sur un substrat silicium et sur un substrat de polymère. ....	102
<b>Figure V-24</b> : Effet du choix du substrat sur la réponse optique dans des conditions normales de laboratoire (courbes plaines) et à 70 °C ( courbes discontinues) d'un <i>DWDM</i> (8x8 100 GHz) fabriqué sur un substrat de silicium et sur un substrat de polymère. ....	103
<b>Figure VI-1</b> : Motifs conçus pour le procédé A.....	106
<b>Figure VI-2</b> : Motifs conçus pour le procédé B.....	106
<b>Figure VI-3</b> : Perte de courbure en fonction du rayon de courbure pour cinq différents échantillons de type A.....	110
<b>Figure VI-4</b> : Moyenne de la mesure de la perte de courbure en fonction du rayon de courbure pour cinq échantillons de type A. ....	110
<b>Figure VI-5</b> : Perte de courbure en fonction du rayon de courbure pour trois différents échantillons de type B.....	111
<b>Figure VI-6</b> : Moyenne de la perte de courbure en fonction du rayon de courbure des trois échantillons de type B.....	111
<b>Figure VI-7</b> : Perte d'insertion de deux guides droits et un guide courbé.....	113
<b>Figure VI-8</b> : Réponse optique du canal central (numéro 8) à une source (1500 nm) polarisée et non polarisée.....	114

<b>Figure VI-9</b> : Pertes dues à la courbure en fonction du rayon de courbure pour les échantillons de type A.....	115
<b>Figure VI-10</b> : Pertes dues à la courbure en fonction du rayon de courbure pour les échantillons de type B.....	116
<b>Figure VII-1</b> : Profil de mode de la fibre mono-mode (SMF).....	121
<b>Figure VII-2</b> : Coordonnées utilisées dans ce chapitre.....	123
<b>Figure VII-3</b> : La distribution du champ électrique de premier mode de la fibre et de guide rectangulaire.....	124
<b>Figure VII-4</b> : Perte de couplage en fonction des dimensions du guide d'onde et pour différentes valeurs de $\Delta n$ .....	124
<b>Figure VII-5</b> : Résultats expérimentaux de perte de couplage pour différents $\Delta n$ et diverses dimensions du guides.....	126
<b>Figure VII-6</b> : Comparaison entre les valeurs de la perte de couplage expérimentale et théorique pour différents $\Delta n$ et diverses dimensions.....	126
<b>Figure VII-7</b> : Histogramme de la différence entre les pertes de couplages mesurées expérimentalement et les résultats théoriques.....	127
<b>Figure VII-8</b> : Perte de couplage en fonction de la longueur d'onde entre la fibre (SMF) et les deux modes de guide d'onde.....	129
<b>Figure VII-9</b> : Perte de couplage en fonction du désalignement latéral sur l'axe (x) dans une seule direction.....	130
<b>Figure VII-10</b> : Angle entre l'axe de la fibre et l'axe du guide d'onde.....	131
<b>Figure VII-11</b> : Perte de couplage en fonction de désalignement angulaire de deux fibres (SMF).....	132
<b>Figure VII-12</b> : Résultats expérimentaux des pertes de couplage entre deux fibres mono-modes en fonction du désalignement angulaire.....	132
<b>Figure VII-13</b> : Divergence du faisceau à la sortie de la fibre.....	134
<b>Figure VII-14</b> : Perte de couplage en fonction de la distance entre deux guides d'onde.....	136

<b>Figure VII-15</b> : Réflexion de Fresnel à l'interface de deux milieux différents.....	138
<b>Figure VII-16</b> : Perte due à la réflexion de Fresnel Pour $n_1 = 1.468$ .....	138
<b>Figure VII-17</b> : La réflexion de Fresnel dans les différentes interfaces.....	138
<b>Figure VII-18</b> : Réflexion de Fresnel à différentes interfaces séparant différents milieux.	
.....	140
<b>Figure VII-19</b> : Perte de couplage en fonction de la longueur d'onde.....	142
<b>Figure VII-20</b> : Période de perte de couplage en fonction de la distance entre la fibre et le guide.....	142
<b>Figure VII-21</b> : Perte de couplage entre deux fibres mono-mode SMF en fonction de la longueur d'onde pour différentes distances séparant les fibres. ....	143
<b>Figure VII-22</b> : Les différentes réflexions dans la configuration fibre-guide d'onde-fibre.....	143
<b>Figure VII-23</b> : L'angle entre le guide d'onde et la facette de bloc à fibre.....	144
<b>Figure A-1</b> : Schéma du montage par prisme .....	162
<b>Figure A-2</b> : Vue de face d'un guide d'onde plane montrant un mode qui se propage suivant un parcours zig-zag. ....	162
<b>Figure B-1</b> : Illustration des longueurs d'onde nominales d'un <i>DWDM 1x8</i> .....	168
<b>Figure B-2</b> : Illustration de la longueur d'onde du maximum de puissance dans deux cas différents. ....	169
<b>Figure B-3</b> : Schématisation de la bande plate. ....	170
<b>Figure B-4</b> : Illustration de l'uniformité de la réponse optique d'un <i>DWDM</i> . ....	171
<b>Figure B-5</b> : définition de la perte d'insertion pour un canal d'un <i>DWDM</i> . <i>WOR</i> est l'intervalle d'opération en longueur d'onde. ....	173
<b>Figure B-6</b> : Espacement entre les canaux.....	174
<b>Figure B-7</b> : Largeur de bande dans le cas d'une réponse optique idéal. ....	175
<b>Figure B-8</b> : Définition de la diphotie.....	177
<b>Figure B-9</b> : Fluctuation de la réponse optique en fonction de la polarisation.....	179
<b>Figure B-10</b> : le montage utilisé pour la mesure de perte due au retour de puissance ..	180

**Figure B-11** : Dépendance de la longueur d'onde centrale à la polarisation..... 181

## LISTE DES ANNEXES

<b><u>ANNEXE A</u></b>	<b><u>COUPLAGE PAR PRISME</u></b>	<b><u>158</u></b>
<u>A-1</u>	<u>Méthode du couplage par prisme</u>	158
<u>A-2</u>	<u>Détermination de l'indice effectif</u>	158
<u>A-3</u>	<u>Détermination de l'épaisseur de film</u>	159
<b><u>APPENDICE B</u></b> <b><u>Le PROTOCOLE DE MESURE POUR EFFECTUER</u></b> <b><u>UNE CARACTÉRISATION SOMMAIRE D'UN COMPOSANT</u></b> <b><u>DWDM</u></b> ..... <b><u>163</u></b>		
<u>B-1</u>	<u>Préparation des éléments nécessaires aux mesures</u>	163
<u>B-1.1</u>	<u>Utilisation de l'isopropanol pour le nettoyage</u>	163
<u>B-1.2</u>	<u>Utilisation du « Dust off » (air comprimé et sec)</u>	163
<u>B-1.3</u>	<u>Observation du connecteur au microscope à fibre « fiberscope »</u>	164
<u>B-2</u>	<u>Différentes phases de la mesure optique</u>	164
<u>B-2.1</u>	<u>Disposition de l'échantillon sur le bâti d'alignement (<i>setup</i>)</u>	164
<u>B-2.2</u>	<u>Alignement des fibres entrée/sortie</u>	164
<u>B-2.3</u>	<u>Couplage</u>	164
<u>B-2.4</u>	<u>Utilisation de la source large bande (SLB) à <math>1.55 \mu\text{m}</math> et de l'analyseur de spectre optique</u>	165
<u>B-2.5</u>	<u>Étude à <math>1.3 \mu\text{m}</math></u>	166
<u>B-2.6</u>	<u>La référence</u>	166
<u>B-3</u>	<u>Établissement de la fiche d'identité du composant</u>	166
<u>B-4</u>	<u>Archivage des informations</u>	167

<u>B-5</u>	<u>Tests optiques sur les composants DWDM: Paramètres à caractériser.....</u>	167
<u>B-5-1</u>	<u>Introduction.....</u>	167
<u>B-5-2</u>	<u>Longueur d'onde nominale (<i>Nominal wavelength</i>) .....</u>	168
<u>B-5-3</u>	<u>Longueur d'onde du maximum de puissance .....</u>	169
<u>B-5-4</u>	<u>Bande plate.....</u>	170
<u>B-5-5</u>	<u>Uniformité.....</u>	171
<u>B-5-6</u>	<u>Perte d'insertion.....</u>	172
<u>B-5-7</u>	<u>Espacement entre les canaux (<i>Channel Spacing</i>) .....</u>	173
<u>B-5-8</u>	<u>Largeur de bande (bande passante) à 1dB, 3dB, 10dB et 20dB .....</u>	174
<u>B-5-9</u>	<u>Diaphonie (<i>Crosstalk, XT</i>) et isolation (<i>AXT</i>).....</u>	176
<u>B-5-10</u>	<u>Variation de puissance due à la dépendance du composant à la polarisation de la lumière injectée (<i>PDL</i>).....</u>	178
<u>B-5-11</u>	<u>Perte par réflexion de puissance vers la source (<i>Return loss</i>).....</u>	179
<u>B-5-12</u>	<u>dépendance de la longueur d'onde centrale à la polarisation .....</u>	180
<u>B-5-13</u>	<u>Dépendance de la largeur de bande à la polarisation.....</u>	182
<u>B-6</u>	<u>Conclusion .....</u>	182

## INTRODUCTION GÉNÉRALE

La technologie des semi-conducteurs a connu une évolution progressive mais rapide. À chaque étape de son histoire, une difficulté, généralement d'ordre échelles ou dopants, a été surmonté. Par contre, le choix du matériau de base n'a jamais été remis en question et les semi-conducteurs *III-V* restent privilégiés. Or, pour passer de l'échelle moyenne d'intégration (*Medium Scale Integration*) à une échelle supérieure (*Very Large Scale Integration*), il a fallu développer de nouvelles techniques au détriment d'autres depuis longtemps maîtrisées. En effet, le procédé par diffusion a fait place à l'implantation ionique [Sze. S. 85], dans laquelle la température n'est plus un paramètre contraignant. Mieux encore, on y contrôle la concentration et la profondeur de diffusion des dopants ainsi que la diffusion latérale de ces derniers. Toutefois, il y a un prix à cette amélioration substantielle, qui est le coût très élevé d'équipement et d'entretien ainsi que la nécessité d'une main d'œuvre hautement qualifiée. Ce sort n'est pas exclusif à la technologie des semi-conducteurs: il en est de même pour bien d'autres technologies telles que l'optoélectronique et la photonique. Cette dernière, de plus en plus intégrée et monolithique, fait face à des difficultés de taille.

Avec l'avancement des systèmes de télécommunication, les technologies de l'optique intégrée [Emil. S. 69] et de l'interconnexion optique [Goo. J. 84] deviennent de plus en plus importantes. Les principaux composants de ces deux dernières technologies sont les circuits photoniques intégrés (*PICs*), les circuits optoélectroniques intégrés (*OEICs*) et les modules de multi-composants optoélectroniques (*multichip*) module (*OE-MCMs*). Les signaux optiques sont transmis à travers des guides d'ondes optiques qui interconnectent différents composants optoélectroniques. Divers matériaux optiques ont été étudiés, tels que le verre, le niobate de lithium, les semi-conducteurs *III-V* et les polymères. À base de ces matériaux, une grande variété des composants optiques passifs ont été fabriqués par

différentes technologies telles que l'échange ionique [Sek. M. 84], le dépôt par hydrolyse à la flamme (*flame hydrolysis deposition*) (*FHD*) et la gravure ionique réactive (*reactive ion etching, RIE*) [Kaw. M 87]. Dans le cas des guides d'ondes à base de silice, tous les composants passifs doivent être formés sur le même substrat avant de les interconnecter avec d'autres composants (passifs optoélectroniques) en raison de la haute température de consolidation de la silice ( $1300\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) lors de *FHD* et *RIE*. À cette contrainte, s'ajoute la non-flexibilité des deux technologies *FHD* et *RIE* pour pouvoir satisfaire la demande croissante du marché de télécommunication.

La technologie moderne tend à miniaturiser tout système, en intégrant un grand nombre de différents éléments et fonctions dans un espace restreint. Comme dans le cas des circuits électroniques intégrés, de grands efforts ont été déployés pour développer des circuits optiques à base de couches minces [Mar. P. 97] afin de réduire les problèmes d'alignements et d'encombrement généralement rencontrés en optique classique. En raison de l'importance de ce projet, nous en avons fait le but majeur de notre thèse.

D'autre part, bien que la science des matériaux photoniques soit récente, les recherches et développements du sol-gel [Sze. S. 85][Mar. P. 97][Edd. J. 92][Gel. J. 7<sup>th</sup>] et de polymères [Tre. H. 89][Sul. C. 88][Wat. I. 90] destiné aux applications photoniques ont connu un grand essor. Les objectifs de cette recherche consistent à:

- a) découvrir de nouveaux matériaux ;
- b) améliorer les propriétés optiques et mécaniques de matériaux prometteurs;
- c) rendre la technologie des matériaux plus flexible;
- d) atteindre le potentiel de production de masse afin de satisfaire la demande croissante du marché de télécommunication.

Le domaine de l'optique intégrée fait l'objet actuellement de recherches intenses et très prometteuses, notamment dans le domaine des télécommunications et du traitement optique du signal (modulateurs, amplificateurs, micro-lasers, multiplexeurs,

commutateurs, etc.). Nous avons, en particulier, fait l'étude des matériaux sol-gel et polymères destinés à la fabrication des composants photoniques. Nous avons, à la base de ces matériaux, conçu et fabriqué des composants optiques passifs tels que les multiplexeurs en longueur d'onde dense (*DWDM*) (*Dense Wavelength Division Multiplexing*), qui sont des éléments clés dans les systèmes de télécommunication. Ils sont capables de multi/démultiplexer plusieurs longueurs d'onde avec un minimum de pertes tout en conservant une faible diaphonie (*crosstalk*) entre les canaux.

Ce sont les pertes optiques des composants qui limitent la performance d'un système. Ces pertes proviennent la plupart du temps d'imperfections liées aux propriétés optiques intrinsèques du matériau et au mode d'élaboration des composants optiques. Plusieurs études sont axées actuellement autour de la minimisation de ces pertes. La compréhension des origines de ces pertes et de leurs conséquences sur les propriétés du guide d'ondes sont nécessaires en vue d'une réévaluation du mode d'élaboration de ces matériaux.

Une partie de ce travail de recherche souligne l'interaction profonde qui existe entre l'élaboration, les caractéristiques structurales et les propriétés optiques des films formés à partir de matériaux sol-gel et de polymères. La méthodologie suivie, pour minimiser les pertes de propagation dans un guide d'onde, consiste à déterminer systématiquement l'influence des conditions opératoires de l'élaboration des films sur leur comportement structurel et optique. En vue d'une optimisation de leur performance optique et mécanique.

Ce sont justement les applications à l'optique du verre de sol-gel hybride organique-inorganique et du verre à base de polymère, qui ont motivé une grande partie de notre travail de recherche. Nous nous sommes particulièrement intéressé au verre de sol-gel hybride, et pourtant, il en existe plusieurs autres types, comme le verre de sol-gel consolidé à haute température qui est en soi un diélectrique totalement inorganique et par

conséquent, non-hybride. Le verre de sol-gel hybride, étant issu d'un processus à faible température, est pour sa part un diélectrique organique-inorganique. Le sol-gel hybride est en réalité un matériau qui peut arborer différents comportements selon les proportions relatives des ses constituants organiques-inorganiques. De ces différentes compositions existent différentes propriétés qui peuvent aller d'un extrême quasi-organique (polymère) jusqu'à son antipode quasi-inorganique (verre). Entre ces deux lieux, existe donc la région de multi-fonctionnalités où, dépendant de la composition, divers comportements se côtoient. C'est une zone d'adaptabilité des propriétés à différents problèmes rencontrés en photonique. En somme, ces caractéristiques assurent une flexibilité certaine au matériau.

Pour fabriquer des guides à base de verre, les scientifiques disposent de plusieurs méthodes bien éprouvées par le temps. Ces méthodes font appel à différentes techniques dont les plus répondues sont l'échange ionique, la déposition par plasma ainsi que la déposition par pyro-hydrolyse et, plus récemment, la déposition chimique en phase vapeur. Elles requièrent alors des équipements multiples et dispendieux qui viennent s'ajouter aux coûts de production. En comparaison avec ces méthodes, celle du sol-gel fait appel à des procédés de basses températures, à des équipements modestes et procure des reliefs quasi-parfaits.

Au cours de nos travaux de recherche, nous avons utilisé le sol-gel organique-inorganique, le polymère, le copolymère et le ter-polymère en déposition sur un substrat approprié, ce qui situe ces travaux dans le domaine d'application du verre en optique intégrée. La technologie que nous avons élaborée, possède plusieurs avantages par rapport à celles déjà existantes dans le marché. En effet, elle se distingue, entre autre, par le fait important à considérer aujourd'hui, d'être une méthode relativement simple et peu coûteuse. Cependant, la chimie applicable aux matériaux sol-gel et polymère permet de varier l'apport des différents intrants ainsi que le processus de fabrication, Ceci rend le sol-gel et le polymère des composés complexes à appréhender et par conséquent,

difficiles à manipuler dans une perspective de performance optimale et de conception de composants reproductibles. De nombreux paramètres doivent être contrôlés dans l'élaboration du gel. lui-même; Par exemple, la présence d'eau et d'hydroxyle, difficilement éliminables, ils causent des pertes optiques dans le proche infrarouge. Si ces paramètres sont mal contrôlés (par exemple une mauvaise cuisson), l'expérimentateur peut voir apparaître des problèmes d'adhésion et aussi un rétrécissement dramatique du film qui occasionne souvent des craquelures. Le sol-gel consolidé à des températures élevées, peut justement avoir le désavantage de comporter des contraintes internes et différentielles qui peuvent causer le même type de craquelures.

Un des avantages marquants du sol-gel hybride organique-inorganique réside dans la chimie de celui-ci qui admet des niveaux de contrôles moléculaires qui se manifestent de façon macroscopique sur les propriétés chimiques et physiques du matériau. Nous avons donc, en particulier, tenté dans le cadre de cette recherche, de cerner le comportement de différents sol-gel hybrides: Aluminium, Zirconium et Alumino-phosphate ainsi les polymères Butyl-MethAcrylate (*BMA*), PentaFluoroStyrène (*PFS*) et Penterated Styrene (*SD*).

Nous avons entre autres, investigué les changements d'indice de réfraction des couches minces occasionnés d'abord par une exposition aux ultraviolets pendant différentes durées et, ensuite, ceux résultant de la variation de la température et le temps des différentes cuissons. De plus, nous avons étudié la variation de l'épaisseur des couches minces en fonction de la viscosité et de la vitesse de déposition des couches minces. Les mesures relatives à ces changements d'indice de réfraction et d'épaisseur ainsi que l'estimation des pertes de propagation dans les couches guidantes planes, ont été effectuées à l'aide d'un système de couplage par prisme dont nous présenterons le fonctionnement et les principes sous-jacents dans l'appendice A. Dans le chapitre I, nous exposerons d'une façon générale, les étapes de synthèse d'un sol-gel organique-

inorganique et des polymères destinés à la photonique tout en déterminant leur spectre d'absorption, d'où leur application éventuelle à l'optique intégrée.

Le chapitre II sera consacré exclusivement à la caractérisation optique au niveau des couches minces du sol-gel organoaluminophosphate. Dans ce chapitre, nous avons étudié la variation de l'indice de réfraction en fonction des procédés thermiques et ultraviolet ainsi que la dépendance de la biréfringence des couches minces de traitement thermique et ultraviolet.

L'étape de la conception des composants optiques *DWDM*, basée sur la théorie du réseau sélectif planaire (*Arrayed WaveGuide*) (*AWG*), sera une suite logique pour concrétiser la fonctionnalité et l'efficacité du sol-gel et du polymère dans le domaine de la photonique. C'est ce qui fera l'objet de chapitre III où nous décrirons en détail la théorie *AWG* et la conception des *DWDM*. De plus nous y présentons quelques résultats expérimentaux.

L'optimisation du procédé photolithographique et de microfabrication pour améliorer les performances optiques des composants *DWDM* feront l'objet du chapitre IV. Dans ce chapitre nous exposerons une méthode de choix du solvant pour améliorer la gravure chimique humide. De plus nous verrons l'importance du choix des couches tampon et gaine pour réformer la réponse optique des composants *DWDM* conçus.

L'étude des propriétés thermo-optiques du sol-gel à Zirconium et des polymères utilisés dans la fabrication des composants optiques *DWDM* sera l'objet du chapitre V. Selon les propriétés thermo-optiques des différents matériaux utilisés, nous sélectionnons ceux qui sont capable de former une structure avec le minimum de stress pour éviter les pertes additionnelles dues à la polarisation. De plus, dans ce même chapitre, nous exposerons une étude détaillée des propriétés thermo-optiques des différentes couches qui constituent

la structure de composant *DWDM*, ainsi que le choix approprié d'un substrat à base de polymère, pour la réalisation d'un composant *DWDM* insensible à la température.

Dans les deux derniers chapitres, nous nous intéresserons à l'optimisation de la réponse optique des composants *DWDM*. Nous concevons ainsi, dans le chapitre VI, des composants *DWDM* mono-mode. Cette conception a pour dessein, d'optimiser les paramètres géométriques, les dimensions des guides d'ondes et les paramètres optiques, tels que, les indices de réfractions des différentes couches, le substrat, le guide et le couvercle pour le *DWDM 16X16 100 GHz*. De plus, nous procéderons à évaluer des pertes de courbure pour deux procédés différents A et B et à éliminer les effets des modes supérieurs sur la réponse optique de *DWDM*.

Dans les deux derniers chapitres, afin de réduire la diaphonie et la perte d'insertion, nous avons d'une part, investigué, analysé et optimisé le rayon de courbure dans la conception éventuelle des *DWDM*. D'autre part, nous avons conçu et fabriqué des *DWDM* mono-modes dans le but d'éliminer l'effet des modes supérieurs sur la diaphonie et la perte d'insertion. De plus, nous avons étudié les paramètres susceptibles d'affecter les pertes de couplage entre une fibre mono-mode et un guide d'onde rectangulaire. Pour atteindre ces objectifs, nous avons effectué des simulations mettant en évidence les effets de ces paramètres. Les résultats de ces simulations ont été confrontés aux ceux obtenus expérimentalement.

En conclusion, nous ferons un bilan de nos résultats et nous dégagerons les perspectives envisagées en vue de l'amélioration des performances des composants optiques, les *DWDM* en particulier. Ainsi, nous mettrons en évidence le potentiel des matériaux sol-gel et polymères dans la technologie des télécommunications.

Cette recherche a été menée au Département de Génie Physique de l'École Polytechnique en étroite collaboration avec le Laboratoire de Chimie de l'Université Mc-Gill, au département de Photonique du Centre National de Recherche *CNRC* à Ottawa et avec la contribution de la compagnie Lumenon.

# **CHAPITRE I.        SYNTHÈSE DU SOL-GEL ORGANIQUE-INORGANIQUE ET POLYMIÈRES POUR MATÉRIAUX OPTIQUES**

## **I.1 Sol-gel organique-inorganique**

### **I.1.1 Introduction**

Les sols et gels constituent deux formes de la matières connues depuis longtemps et qui existent à l'état naturel. Ils comprennent des matériaux inertes comme les argiles et l'encre mais aussi des matériaux vivants comme la vitrée de l'œil, le sérum ou le lait [Liv. J. 82]. Dans le cadre de la science des matériaux, l'intérêt des scientifiques s'est orienté vers ces deux formes de la matières depuis quelques années seulement, même on considère Graham comme le fondateur de la science des colloïdes dès 1861.

Si pendant longtemps l'intérêt des sols et gels a été purement scientifique, un premier domaine d'application est apparu avec les catalyseurs en raison de la surface spécifique extrêmement élevée de ces produits. L'orientation vers des céramiques dans les domaines de haute technologie a commencé lentement à partir de 1960, à la suite des travaux sur les silicates, les argiles [For. R. 64], et les oxydes nucléaires en Angleterre, ainsi que des études de Matijevic [Mat. E. 77] destinées à produire des particules colloïdales de taille et de forme contrôlées. Le nombre de publications dans le domaine des gels colloïdes inorganiques croît de façon significative depuis les années soixante-dix. Ceci a conduit à un nombre croissant d'applications intéressantes dans les technologies avancées, dont certaines ont atteint le stade de la commercialisation.

Un ‘sol’ est défini comme étant une dispersion stable de particules colloïdales au sein d’un liquide [Hie. P. 77]. Afin que des particules solides, plus denses que le liquide restent dispersées, il est nécessaire que leur taille soit suffisamment petite pour que les forces responsables de la dispersion ne soient pas surpassées par la gravitation. Elles doivent aussi comporter un nombre statistiquement significatif d’atomes. Pour des tailles trop petites, il faudrait parler de molécules en solution.

Un ‘gel’ peut être défini comme un réseau solide tri-dimensionnel interconnecté, expansé d’une matière stable à travers un milieu liquide. Si le réseau solide est constitué de particules, le gel est dit ‘colloïdal’. Et, si le réseau solide est constitué d’unités chimiques sub-colloïdales (des macromolécules), le gel est dit polymérisé. Un polymère étant défini [Sey. D. 84] comme étant un groupe de molécules dont la structure peut être générée par la répartition d’un ou plusieurs éléments unitaires. La variété des gels inorganiques, comme celle des sols, est importante. Plusieurs classifications ont été proposées mais la plus complète reste celle de Flory [Flo. J. 74].

Dans un sol, les composants sont dispersés d’une manière homogène et dans un gel cette dispersion homogène est figée, ce qui empêche le développement d’inhomogénéités dans le gel. Un sol (ou une solution) se transforme en un gel colloïdal (ou polymérisé) en passant par un point de gélification [Flo. J. 53] et correspond à une transformation brutale d’un liquide visqueux en un solide: le gel. Nous disposons maintenant d’une description précise du point de gélification ainsi que de certaines caractéristiques et propriétés du gel ou du sol près de ce point. Ces informations nous sont fournies par la théorie des phénomènes critiques.

La chimie du sol-gel est basée sur l’hydrolyse et la condensation du métal alkoxyde [Bri. C. 90]. Cependant, le sol-gel destiné à la fabrication des matériaux optiques, nécessite des propriétés complexes comme la transparence, l’hydrophylicité ou le contrôle de la porosité. La modification chimique des alkoxydes métalliques par des

éléments nucléophiles permet le contrôle chimique pendant le processus de polymérisation. De plus, les matériaux hybrides ou organiques-inorganiques peuvent être obtenus lorsque des ligands (groupes) organiques non hydrolysables sont liés au métal précurseur.

Le premier article sur le sol-gel optique a été publié en 1845 par le chimiste français M. Ebelmen, qui avait remarqué que l'éther de silice subit une hydrolyse en présence de l'humidité pour donner de la silice hydratée. Il en conclut qu'un tel processus peut être utilisé pour produire des éléments optiques [Ebe. M. 1845]. Un siècle et demi plus tard, le sol-gel optique est devenu l'activité principale de la science du sol-gel, comme cela a été présenté par les deux conférences à San Diego en 1990 et 1992 [Mac. J. 90].

### I.1.2 Avantages du sol-gel

Le processus actuel du sol-gel offre des opportunités uniques pour la synthèse de matériaux optiques. Nous présentons certains de ces avantages comme suit:

- La voie du sol-gel convient pour la production des matériaux en forme de couche mince, fibres, poudres fines et monolith [Kle. L. 88].
- Le mélange homogène de plusieurs composants au niveau moléculaire permet de modifier la nature chimique de ces matériaux dans le but d'ajuster leurs propriétés optiques (indice de réfraction par exemple).

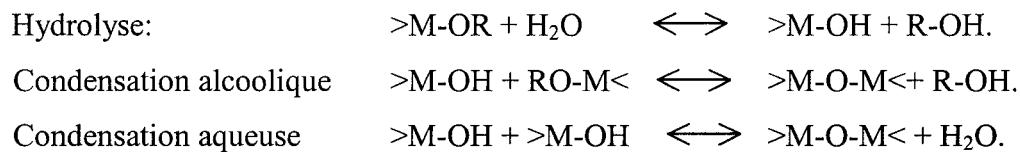
Le processus du sol-gel permet de contrôler la porosité des matériaux. Ces pores peuvent être imprégnés (remplis, fécondés) par des monomères organiques polymérisables [Abr. B. 90], ou bien par des colorants organiques optiquement actifs [Rei. R. 92]. L'ouverture des pores rend les molécules accessibles à d'autres réactifs dont les propriétés peuvent être utilisées afin de développer des capteurs chimiques [Sla. A. 98]. Plusieurs nouveaux matériaux hybrides organiques-inorganiques ont été synthétisés via le processus du sol-gel. Ils remplissent l'intervalle entre les polymères et le verre [Shm. H. 84]. Comparé à d'autres procédés de fabrication des verres utilisés en optique intégrée (GIO, Glasse

Integrated Optics), le coût d'investissement destiné aux équipements pour produire le sol-gel est beaucoup plus modeste.

### I.1.3 Génie moléculaire des métaux alkoxydes

#### I.1.3.1 Hydrolyse et condensation

La chimie du sol-gel est basée sur l'hydrolyse et la condensation des métaux alkoxyliques [Bri. C. 90]:



Les réactions ci-dessus schématisent les processus complexes d'hydrolyse et de polycondensation qui génèrent le "sol". En principe, le processus est applicable à tous les métaux alkoxydes bien que les alkoxydes de silicium soient les plus étudiés.

Comparé à d'autres méthodes de fabrication du verre (*glass methods*), le sol-gel a l'avantage que la dépôt se fait à basse température (la consolidation ne se fait pas nécessairement à basse température) et donne des formes bien conformes.

La solution du sol-gel représente un milieu complexe de part sa chimie très flexible au niveau de la composition et du processus. Par conséquent, les divers phénomènes chimiques du milieu sol-gel sont mal compris, ce qui rend difficile la manipulation de la solution en vue d'optimiser et de reproduire des éléments optiques d'une façon satisfaisante. Autrement dit, en effectuant les divers processus de préparation du sol-gel, on doit contrôler l'eau et l'hydroxyle fortuite, sources indésirables favorisant des pertes optiques considérables dans le domaine de l'infrarouge, et le rétrécissement dramatique des couches minces lors de la consolidation. Ce phénomène de rétrécissement est souvent accompagné d'une forte tension causant des bris (craquelures).

### I.1.3.2 Préparation du sol-gel hybride organique-inorganique

Le sol-gel que nous avons utilisé pour fabriquer des éléments optiques, se compose des trois éléments organiques suivants: le méthacryloxypropyletrimethoxylane (*MAPTMS*)  $H_2C=C(CH_3)CO_2(CH_2)_3Si(OCH_3)$ , qui est la matrice de base, le zirconium (IV)-n-propoxyde  $Zr(OC_3H_7)_4$  (*ZPO*) et l'acide méthacrylique  $H_2C=C(CH_3)COOH$  (*MAA*). Nous avons préparé la solution sol-gel en modifiant la procédure publiée par Krug et al. [Kru. H. 92]. Le composant *MAPTMS* agit directement sur le réseau primaire (c'est un modificateur du réseau) et fournit un réseau organique-inorganique. Ainsi, les liaisons formant les tétraèdres de silice sont perturbées par les groupes organiques fonctionnels en agissant directement sur les sites de silicium.

Les substituants organiques rendent le verre résultant plus flexible, et diminuent ainsi sa vulnérabilité aux craquelures. Le substituant méthacryloxy est photo-polymérisable et donne naissance, après son exposition aux ultraviolets, à un réseau organique secondaire ramifié.

Le  $Zr^{4+}$  est ajouté pour augmenter l'indice de réfraction et fournit une stabilité mécanique au verre. L'incorporation homogène de  $Zr^{4+}$  comme  $ZrO_2$ , est apparemment assistée par la complexion avec (*MAA*). Cette complexion empêche l'hydrolyse rapide de l'alkoxyde de zirconium qui conduirait vers la précipitation des particules de  $ZrO_2$ .

### I.1.3.3 Différentes étapes de la préparation de la solution du sol-gel

Dans cette sous-section, nous décrivons les différentes étapes de la préparation de la solution sol-gel photosensible. Le méthacryloxypropyl trimethoxysilane (*MAPTMS*)<sub>3</sub> a été utilisé comme matrice de base consistant à des liens inorganiques (*Si-O-Si*) ainsi qu'à un réseau organique composé d'un motif vinyle photosensible.

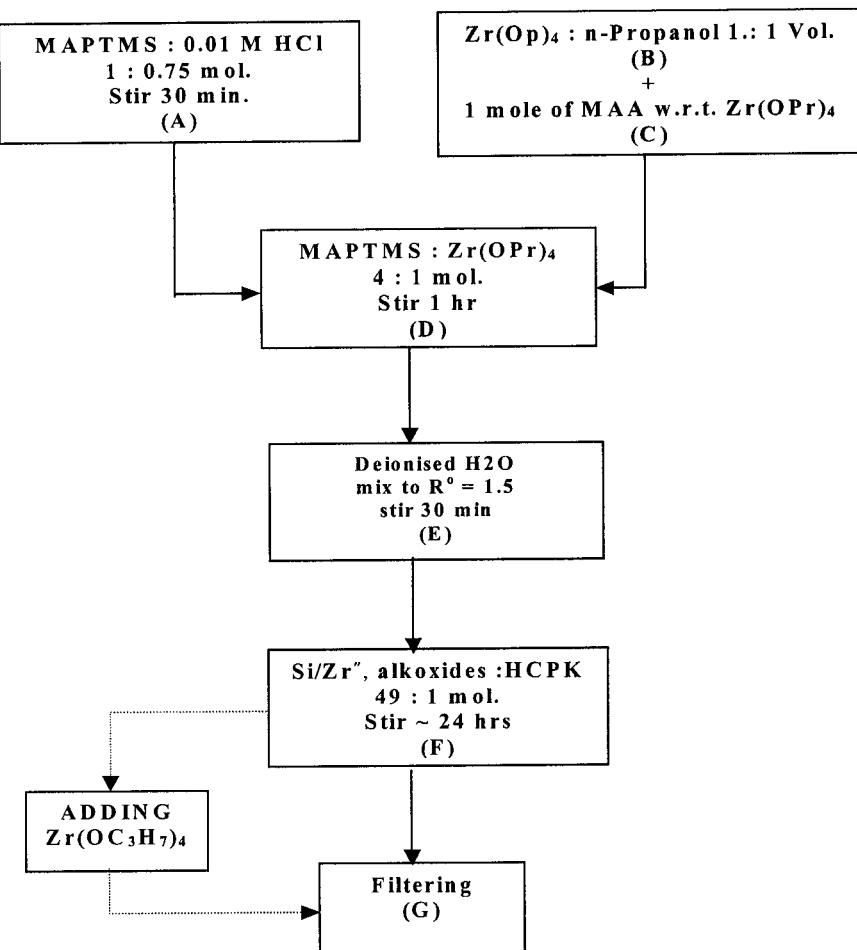
Nous disposons de deux sortes de solutions sol-gel photosensibles. Chacune est utilisée à des fins bien spécifiques pour la fabrication des guides d'ondes. La première de ces solutions est un mélange de *MAPTMS* avec l'acide méthacrylique et  $Zr(OC_3H_7)_4$ , tandis que la seconde s'obtient en mélangeant *MAPTMS* avec l'isobutoxy-alumino-yltrithoxylane (*BATES*). La préparation de la solution du sol-gel contenant le zirconium

peut être effectuée en cinq étapes, comme le montre la **Figure I-1** et que nous résumons comme suit:

1. La solution A s'obtient par le mélange de *MAPTMS* avec *0.01 M HCl* dans une proportion molaire de *1:0.75*.
2. La solution B s'obtient en mixant le zirconium(IV)-n-propoxyde ( $Zr(OC_3H_7)_4$ ) avec n-propanol dans un rapport volumique *1:1*. On ajoute ensuite une *mole* d'acide méthacrylique  $H_2C=C(CH_3)COOH$  par mole de  $Zr(OPr)_4$ , on obtient alors le troisième mélange C.
3. Dans cette troisième étape, on mélange les solutions A et C, pour obtenir une solution D contenant *MAPTM* et  $Zr(Pr)_4$  dans un rapport molaire de *4:1*.
4. À cette dernière solution D, on ajoute de l'eau déionisée afin d'obtenir une solution E, où le rapport molaire de l'eau à celui de Silicium et de l'alkoxyde de zirconium est de *1:5*.
5. La dernière étape conduit à l'obtention de la solution sol-gel photosensible, en ajoutant à la solution E, le 1-hydroxyclohexylphenylketone  $C_6H_5COC_6H_{10}OH$  Irgacure 184 (*HCPK*). Cette solution finale, que nous appelons solution F, contient le silicium (*Si*), l'alkoxyde de Zirconium et *HCPK* dans un rapport molaire de *49:1*.

Après une étape de filtration de la solution F. Nous obtenons ainsi une solution de sol-gel photosensible filtrée que nous désignons par la solution G dans la **Figure I-1**.

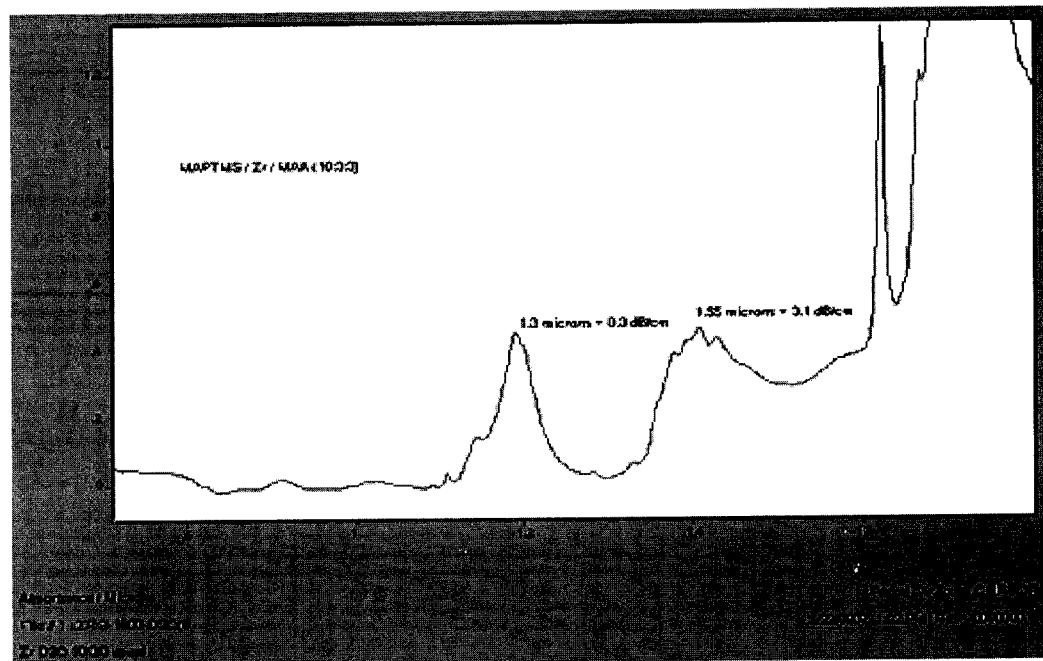
**Remarque:** L'ajout de zirconium(IV)-n-propoxyde  $Zr(Pr)_4$  a pour effet la modification de l'indice de réfraction du sol-gel.



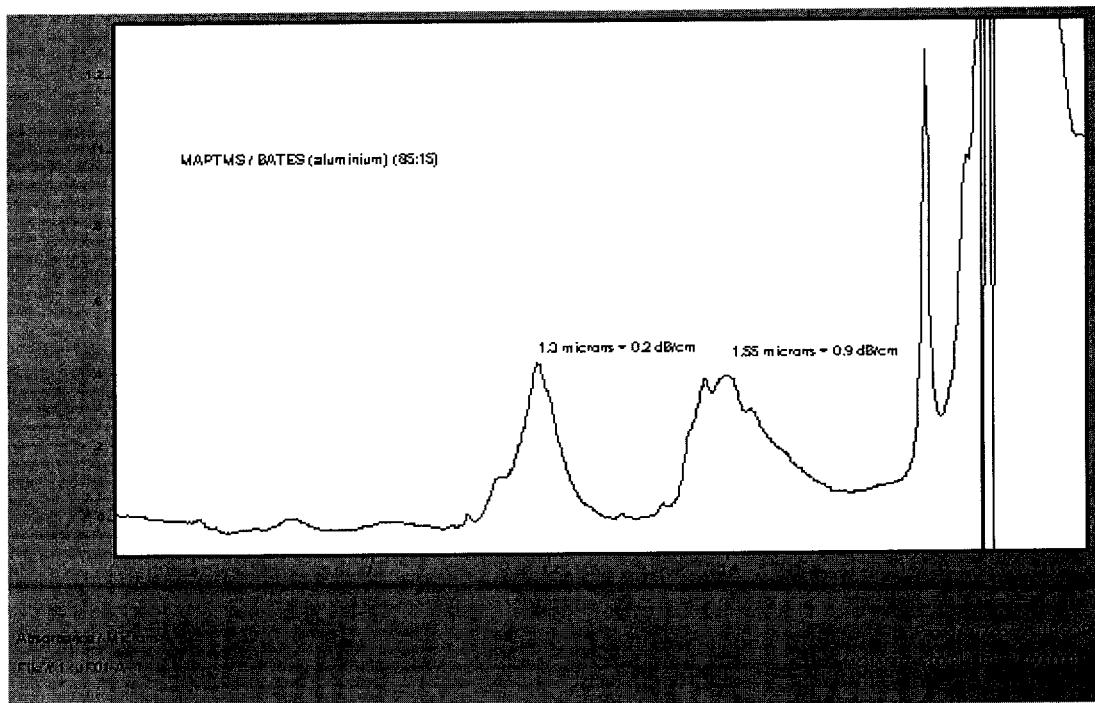
**Figure I-1** : Les étapes de fabrication de la solution sol-gel.

#### I.1.4 Spectre d'absorption de sol-gel organique inorganique à Zirconium et à Aluminium

La **Figure I-2** et la **Figure I-3** montrent respectivement les spectres d'absorptions (*NIR*) dans le proche infrarouge de sol-gel à zirconium et du sol-gel à aluminium. Le rapport molaire des trois composants, *MAPTMS / Zr / MAA*, du sol-gel à zirconium est de *10/3 /3*. Tandis que le rapport molaire des deux constituants, (*MAPTMS / BATES (aluminium)*), du sol-gel à aluminium est de *85 / 15*. les pertes d'absorptions, dans la fenêtre optique *1.3μm*, sont respectivement de l'ordre de *0.2 dB/cm* et *0.3 dB/cm* dans le sol-gel à aluminium et dans le sol-gel à zirconium



**Figure I-2 :** Spectre d'absorption *NIR* du sol-gel à base du zirconium, *MAPTMS/Zr/MAA 10/3/3*.



**Figure I-3 :** Spectre d'absorption *NIR* du sol-gel à base d'aluminium, *MAPTMS / BATES (aluminium) 85/15*.

## I.2 Les polymères

Tenant compte des travaux menés sur des matériaux polymères, nous nous limitons à rappeler brièvement le mécanisme de la réaction de polymérisation radicalaire qui a été adoptée pour la synthèse des polymères utilisés.

### I.2.1 Synthèse des macromolécules par polymérisation radicalaire

La formation des chaînes macromoléculaires peut être effectuée à partir de deux types de réactions:

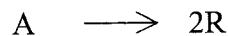
- les réactions de polyaddition ou réactions en chaînes ;
- Les réactions de polycondensation.

La polymérisation radicalaire est une des réactions de polymérisation en chaîne qui s'applique aux monomères renfermant des doubles liaisons. Cette polymérisation s'effectue en trois étapes qui sont l'amorçage, la propagation et la terminaison.

La **Figure I-4** montre un exemple de mécanisme réactionnel de réticulation où l'étape de terminaison est bien illustrée.

#### I.2.1.1 L'amorçage

Cette étape comprend la formation des radicaux libres et leur addition sur le monomère. Cette formation de radicaux se fait à partir de la rupture des liaisons covalentes de l'amorceur sous l'action de la chaleur ou de la lumière.

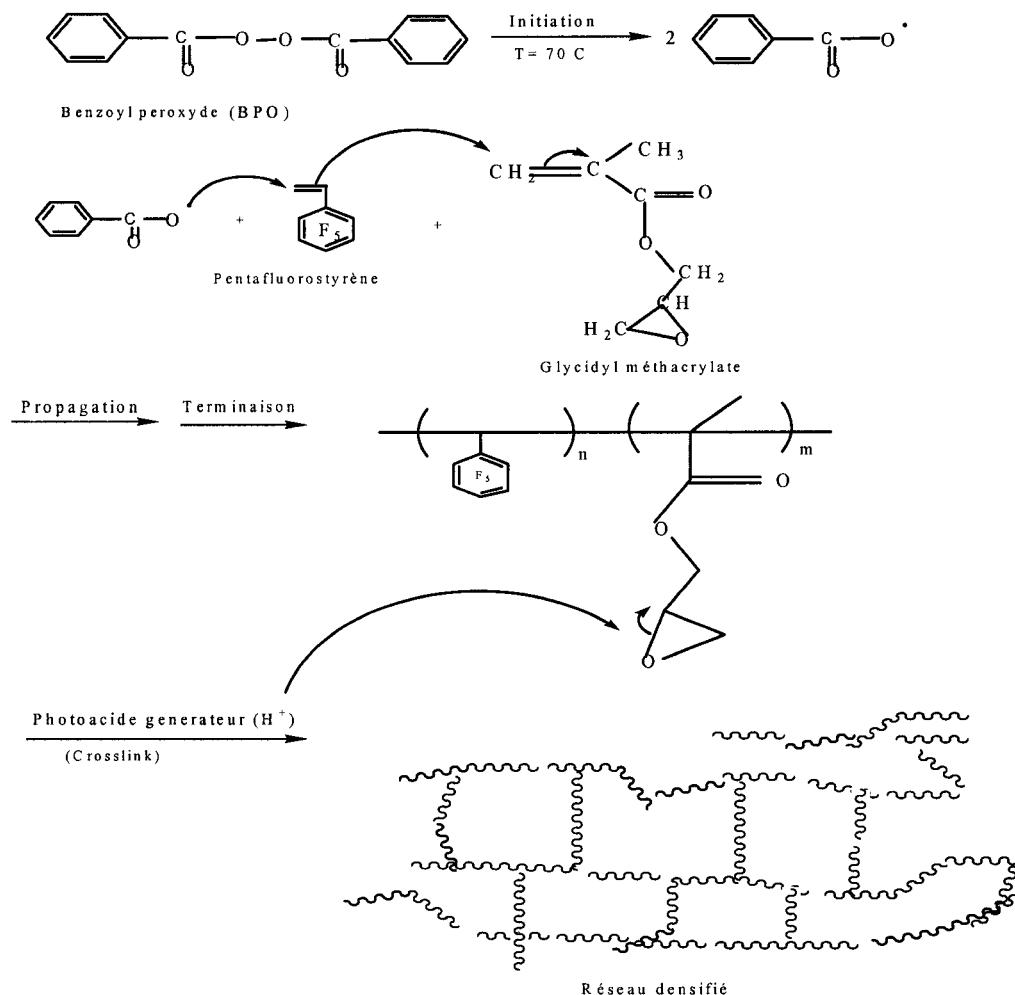


A: l'amorceur,

R<sup>·</sup>: le radical,

M: le monomère.

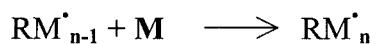
La **Figure I-4** montre un exemple de mécanisme réactionnel de réticulation où l'étape de l'initiation est expliquée.



**Figure I-4:** Exemple de mécanisme réactionnel intervenant trois étapes: Initiation, propagation et terminaison.

### I.2.1.2 Propagation

La formation du polymère s'effectue au cours de cette étape par fixation des centres actifs sur les monomères.



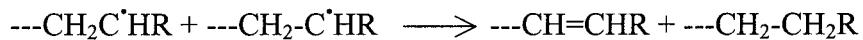
La **Figure I-4** montre un exemple de mécanisme réactionnel de réticulation où l'étape de propagation est montrée.

### I.2.1.3 Terminaison

La terminaison de la croissance de la chaîne macromoléculaire peut s'effectuer par combinaison des centres actifs entre eux:



Elle peut se faire également par dismutation avec transfert d'hydrogène:

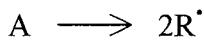


La **Figure I-4** montre un exemple de mécanisme réactionnel de réticulation où l'étape de terminaison est bien illustrée.

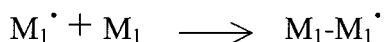
### I.2.2 Copolymérisation radicalaire

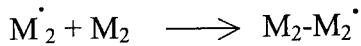
La copolymérisation radicalaire s'effectue à partir d'un mélange de deux monomères différents qui s'additionnent entre eux pour produire un nouveau copolymère et possédant les propriétés des deux monomères. Cette polymérisation peut donner des copolymères statistiques, alternés ou séquencés.

La copolymérisation commence par la formation du centre actif.

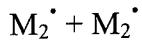
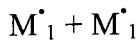


Après formation du groupe actif  $M_1^{\cdot}$  et  $M_2^{\cdot}$  la chaîne polymère peut se développer par fixation d'un monomère  $M_1$  ou  $M_2$

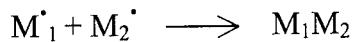




La terminaison peut se faire par combinaison de:



Elle peut aussi se faire par formation d'un copolymère :



Pour décrire convenablement le mécanisme de copolymérisation, il est nécessaire de prendre en considération les divers processus d'amorçage et de terminaison. Cependant, pour un degré de polymérisation élevé, l'influence des modes d'amorçage et de terminaison est négligeable.

### I.2.3 La transition vitreuse

Le phénomène de transition vitreuse indique le degré de liberté des chaînes macromoléculaires. La température de transition vitreuse  $T_g$  est la réponse des mouvements micro-browniens impliquant une configuration d'atomes de carbone de la chaîne principale (*backbone*). Ces mouvements sont réversibles.

Tout changement d'état d'un polymère est accompagné par le changement de toutes ses propriétés physiques. L'agitation thermique, au-dessous de la température de la transition vitreuse, est trop faible et ne peut pas induire des mouvements des chaînes de large amplitude. Les chaînes sont donc contraintes et le polymère est solide; Les seuls mouvements possibles sont les vibrations et les rotations au niveau des liaisons covalentes. Ce sont des mouvements localisés.

En augmentant cette température à un certain domaine, l'agitation thermique correspond à la mobilité d'une cinquantaine d'atomes de carbone environ, qui réussissent à vaincre les interactions entre les chaînes. Cette température correspond à la température de transition vitreuse  $T_g$ . Aussi, au-delà de laquelle le polymère acquiert une souplesse.

La température de transition vitreuse est considérée comme une caractéristique propre à chaque polymère.

### I.3 Mécanismes réactionnels de réticulation des matériaux polymères utilisés

Les matériaux polymères que nous avons développé, ont des propriétés optiques accordables tels que, l'indice de réfraction et les pertes optiques. Ils montrent d'excellentes propriétés mécaniques et physiques indispensables à la fabrication des composants optiques fiables.

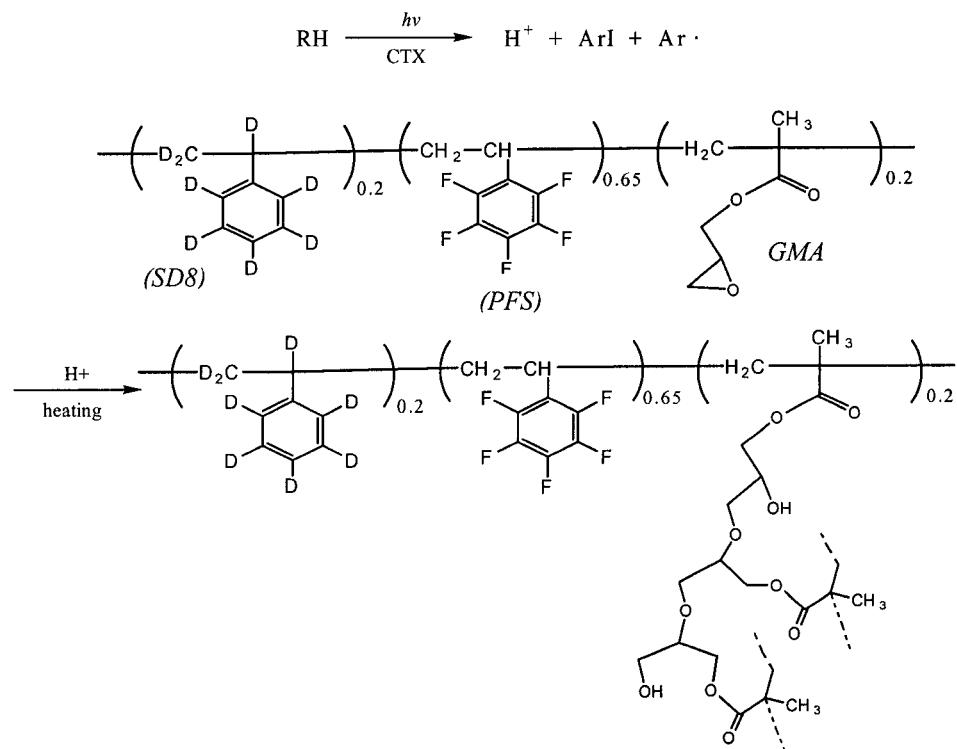
Le processus de polymérisation pour le ter-polymère *SFG* de la couche guidante, s'active en présence d'un photoinitiateur générateur d'acide lors de la réaction avec la lumière ultraviolette. Tandis que le processus de réticulation de la couche tampon *BG* est purement thermique.

#### I.3.1 Matériaux ter-polymère *SFG* associé au guide

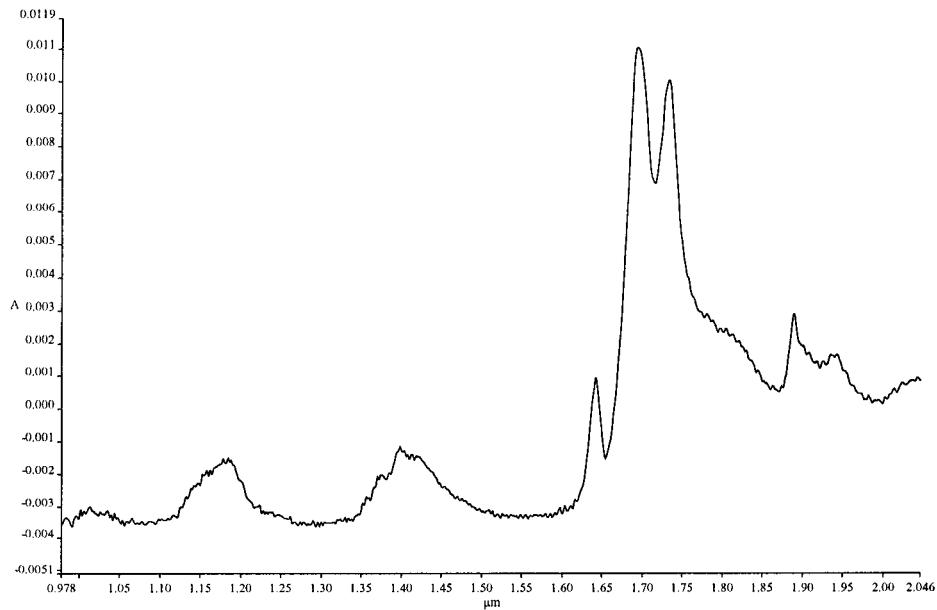
Le ter-polymère fluoré, que nous avons développé, est à la base de trois monomères, le pendeuterated Styrene (*SD8*), le pentafluoro Styrene (*PFS*) et le Glycidyl Methacrylate (*GMA*). Les formules chimiques de ces trois polymères sont présentées à la **Figure I-5**

Le processus de polymérisation est schématiquement décrit dans la **Figure I-5**: le photoinitiateur (*RH*) est un générateur d'acide lorsqu'il est en présence d'un photosensibilisateur (*CTX*) et de la lumière UV. En effet, *Le CTX* émet un proton lors de l'exposition à la lumière UV. Celui-ci va exciter le *RH* qui va se dissocier par la libération d'un proton  $H^+$  qui va permettre l'initiation de la photo-réaction. La photo-réaction chimique amplifiée et l'augmentation du taux de réticulation sont ainsi activés thermiquement par la cuisson d'après exposition.

Le spectre d'absorption *NIR* de la **Figure I-6** a été obtenu à l'aide d'un spectrophotomètre infrarouge. Il montre le spectre d'absorption *NIR* de ter-polymère *SFG* en solution. Ce dernier révèle de faible perte d'absorption dans les deux fenêtres optiques  $1.3$  et  $1.5 \mu m$ .



**Figure I-5 :** Mécanisme réactionnel de réticulation de ter-polymère *SFG*.



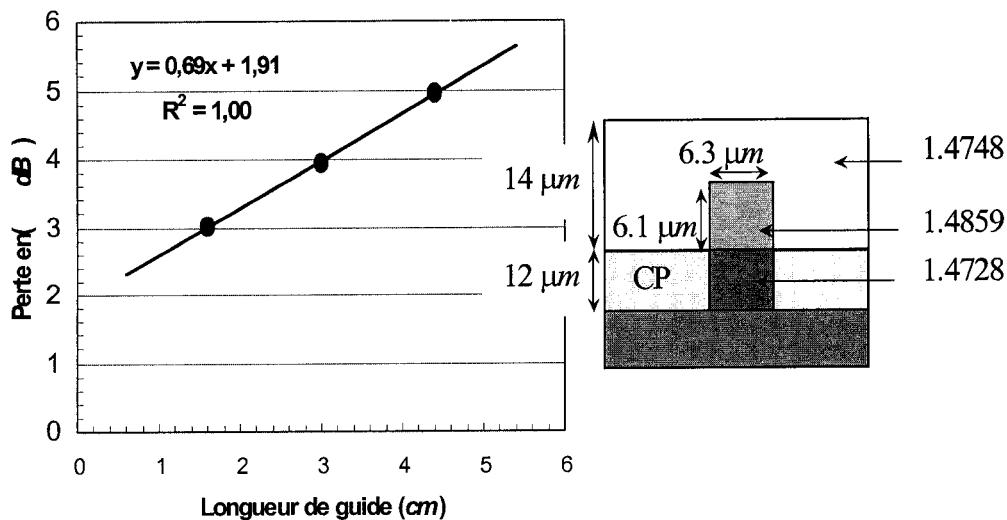
**Figure I-6 :** Spectre d'absorption *NIR* de ter-polymère *SFG*.

En terme de photolithographie, le ter-polymère *PFS* est une photo-résine négative dont la photochimie est basée sur la catalyse acide. Nous avons privilégié la photochimie cationique par rapport à celle radicalaire car la photochimie radicalaire est inhibée par l'oxygène de l'atmosphère lors de la photolithographie.

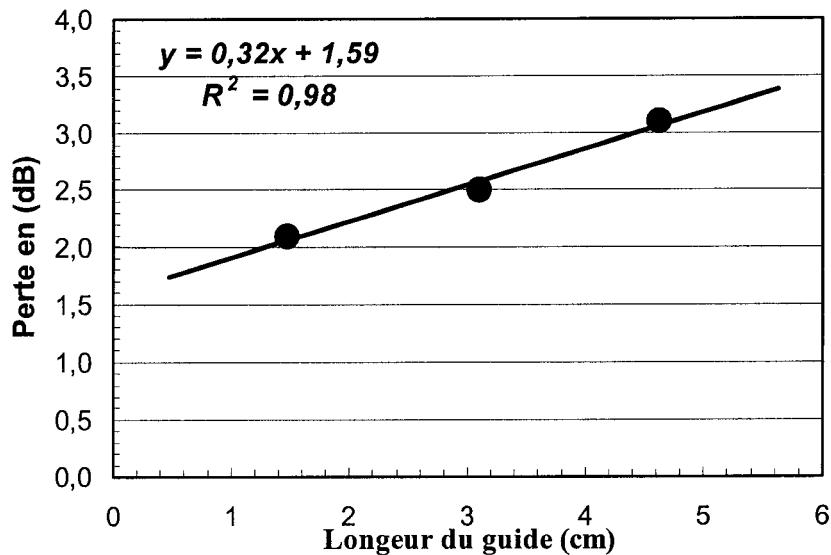
Des pertes optiques ont été mesurées dans des guides d'ondes canaux mono-modes fabriqués selon la photolithographie conventionnelle avec une gravure chimique humide.

Les mesures des pertes de propagations à  $1.3 \mu m$  et  $1.5 \mu m$  dans les guides d'ondes canaux ont été réalisées par la méthode de *cut-back*. La **Figure I-7** montre des pertes de propagations inférieures à  $0.7 dB/cm$  d'un guide d'onde mono-mode ter-polymère (*SFG*). Elle montre aussi le schéma de la structure de guide d'onde, les dimensions du guide d'onde, les épaisseurs des couches tampon et gaine ainsi que leurs indices de réfractions.

La **Figure I-8** montre la moyenne des pertes propagations dans l'intervalle de longueur d'onde  $1290 - 1310 nm$  dans un guide d'onde mono-mode ter-polymère (*SFG*). Elle est de l'ordre de  $0.3 dB / cm$ .



**Figure I-7 :** Mesure des pertes de propagations, par la méthode de *cut-back*, dans un guide d'onde carré ( $6.3 \times 6.3 \mu m^2$ ), *SFG*, à  $1.5 \mu m$ .



**Figure I-8** : Mesure des pertes de propagations, par la méthode de *cut-back*, dans un guide d'onde carré ( $6 \times 6 \mu\text{m}^2$ ) *SFG*. Chaque point correspond à la moyenne des pertes dans l'intervalle de longueur d'onde  $1290\text{--}1310 \text{ nm}$ .

### I.3.2 Matériaux co-polymère des couches tampon et gaine

La solution co-polymère (*BG*) est composée de monomères ButylMetAcrylat (*BMA*) et Glycidylmethacrylate (*GMA*). Tandis que le co-polymère (*FG*) est le mélange des monomères *PFS* et *GMA*. Les deux co-polymères sont utilisés pour la fabrication des couches tampon et gaine. Leurs mécanisme de réticulation est purement thermique en présence d'un agent réticulant, comme la diamine ( $\text{NH}_2\text{-}R\text{-NH}_2$ ).

La **Figure I-9** schématise le mécanisme de réticulation thermique de co-polymère *BG*: les groupes t-Butyle s'ouvrent sous l'effet de la température. Ainsi, des acides carboxyliques sont formés. Ces derniers vont réagir avec les groupes époxy à  $180^\circ\text{C}$  pour former un réseau tridimensionnel.

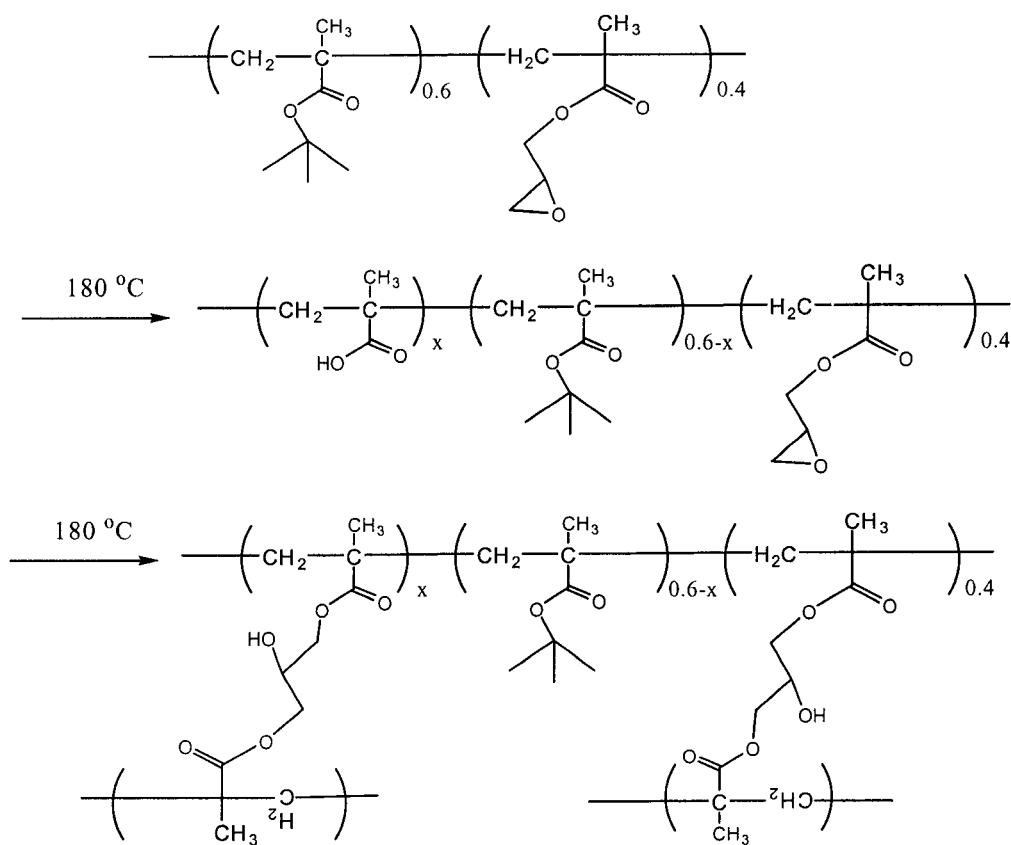


Figure I-9 : Mécanisme réactionnel de réticulation de co-polymère *BG*.

#### I.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exposé d'une façon générale les bases et les avantages du génie moléculaire du sol-gel hybride organique-inorganique. Ensuite, nous avons traité, en particulier, le sol-gel à zirconium. Nous avons signalé que la procédure chimique pour la synthèse du sol-gel destinée à la fabrication des matériaux optiques, dépend de leurs applications éventuelles.

Dans les applications optiques, les matériaux doivent être transparents dans la zone spectroscopique à laquelle ils sont destinés. Ceci dépend des micro-hétérogénéités dans les matériaux. Elles doivent être beaucoup plus petites que la longueur d'onde optique. Ces matrices transparentes peuvent être réalisées à l'aide de particules très petites

(particules colloïdales) ou des espèces polymériques interpénétrants de petites dimensions. Dans les deux cas, la croissance des particules d'oxyde doit être contrôlée par la catalyse acide-base ou par la modification chimique.

Les procédures hybrides organiques-inorganiques conduisent à la formation des matériaux hydrophobes qui sont spécialement souhaitables pour la synthèse du type de sol-gel qui permet l'obtention des couches épaisses non poreuses. Les propriétés chimiques de ces dernières couches peuvent être ajustées par l'ajout d'un métal alkoxyde  $M(OR)_z$  qui agit comme un réactif assembleur (cross-linking reagent).

Nous avons présenté d'une façon générale la synthèse, la caractérisation et la procédure de polymérisation de ter-polymère fluoré *SFG* et de co-polymère *BG*. Nous avons optimisé les rapports molaires des monomères, *SD*, *PFS* et *GMA*, qui composent le ter-polymère *SFG* et ceux de *BMA* et *GMA* qui forment le co-polymères *BG*, en vue de réduire les pertes de propagation, d'améliorer les propriétés thérmo-optiques et la stabilité mécanique.

Nous avons mesuré à l'aide de spectre *NIR*, de faibles pertes optiques de l'ordre de  $0.3 \text{ dB/cm}$  et  $0.5 \text{ dB/cm}$ , respectivement dans les deux fenêtres optiques  $1.3 \mu\text{m}$  et  $1.5 \mu\text{m}$  et dans le ter-polymère *SFG* en solution. De plus, nous avons mesuré les pertes de propagation dans un guide d'onde enterré à l'aide de la méthode de *cut-back*. Les pertes sont respectivement inférieures à  $0.3 \text{ dB/cm}$  et à  $0.7 \text{ dB/cm}$  pour les longueurs d'ondes  $1.3 \mu\text{m}$  et  $1.5 \mu\text{m}$ .

## CHAPITRE II. CARACTÉRISATION DU SOL-GEL ORGANOALUMINOPHOSPHATE

### II.1 Introduction

Le processus du sol-gel à basse température occupe déjà une large place en industrie optique, particulièrement dans le domaine du revêtement et dans la fabrication des fibres et des composants optiques ainsi que dans dosage des semi-conducteurs. Grâce à cette flexibilité extraordinaire, la méthode du sol-gel constitue actuellement un outil très efficace dans la conception des éléments optiques passifs et actifs ainsi que des matériaux optiques non-linéaires. Cette méthode devient, par conséquent, un domaine de recherche très actif de nos jours [Dro. M. 95][Mat. A. 90]. Les méthodes de densification thermique, mécanique et chimique ont été utilisées pour définir des guides d'ondes dans le sol-gel. L'écriture directe par laser souffre d'une mauvaise résolution spatiale, de transfert de la chaleur à la surface et aux régions non irradiées du sol-gel [Naj. S. 92].

Plusieurs principes et de propriétés désirables, très populaires dans le domaine des polymères organiques, peuvent aussi s'étendre au sol-gel. La littérature des mécanismes réactionnels de la densification est très diversifiée, en conséquence, ceci offre des opportunités importantes permettant des modifications organiques sur les verres inorganiques (*inorganique glasses*).

Récemment un processus qui améliore la qualité du film du sol-gel utilisé en optique intégrée a été développé [Li. C. 95][Sch. H. 92]. Les guides d'ondes sont fabriqués simplement en exposant le sol-gel hybride à la lumière ultraviolette (UV) à travers un masque. Les différentes étapes de fabrication des guides d'ondes sont simples et nécessitent des équipements à coût modeste. De plus, le processus se fait à basse température.

Dans ce chapitre, nous présentons le nouveau sol-gel organoaluminophosphate, que notre groupe de recherche a développé. Ce sol-gel possède un faible indice de réfraction et montre des applications potentielles en optique intégrée. L'exposition à la lumière UV est utilisée dans la fabrication des guides plans (*slab waveguide*). Les propriétés optiques de la couche mince du sol-gel sont profondément étudiées. Dans la section II-2, nous décrivons la synthèse du nouveau sol-gel et le processus de fabrication de guides d'ondes à couche mince. Dans la section II-3, nous présentons les résultats et discussions de l'effet du temps d'exposition des films à l'UV, de la température de recuit, de vieillissement du sol-gel et de la technique de préparation des guides à biréfringence zéro. Les résultats seront, ensuite, résumés dans la dernière section.

## II.2 Synthèse et fabrication

Le sol-gel a été préparé selon la procédure résumée dans les références [Li. C. 95] et [Naj. S. 96] avec les modifications suivantes: le précurseur alkoxyde silicon photosensible utilisé pour la préparation du film en verre sol-gel est le methacryloxypropyl trimethoxylane  $H_2C=C(CH_3)CO_2(CH_2)_3Si(OCH_3)_3$  (*MAPTMS*, Unité de technologie chimique), contenant une fonction organique réactive methacryle qui peut être rapidement polymérisée par la lumière UV en combinaison avec l'effet de recuit. Le trimethylphosphate  $(O)P(OCH_3)_3$  (*Aldrich*) et l'isobutoxy-aluminoxy-triethoxy-silane (l'alkoxyde *Al-O-Si*, *UTC*) sont utilisés comme des sources d' $Al^{3+}$  et  $P^{5+}$  dans le verre. Le mélange, Aluminium-Phosphore, en proportion prédéfinie, a pour effet la modification de l'indice de réfraction du matériau, ce qui permet d'avoir un large choix d'épaisseurs de films déposés en une seule couche sans provoquer de craquelure. Le groupe *MATPMS* est pré-hydrolysée pendant deux heures dans une solution aqueuse d'acide hydrochlorique ( $10^{-2} M$ ) (comme catalyseur).

L'aluminium et le phosphore sont ajoutés et mélangés ensemble. Ensuite, on ajoute l'eau pour déclencher la polycondensation et on laisse agir le processus pendant quinze heures. En dernier lieu, on ajoute le photoinitiateur (*IRGAGURE 148, CIBA*) au mélange, avant

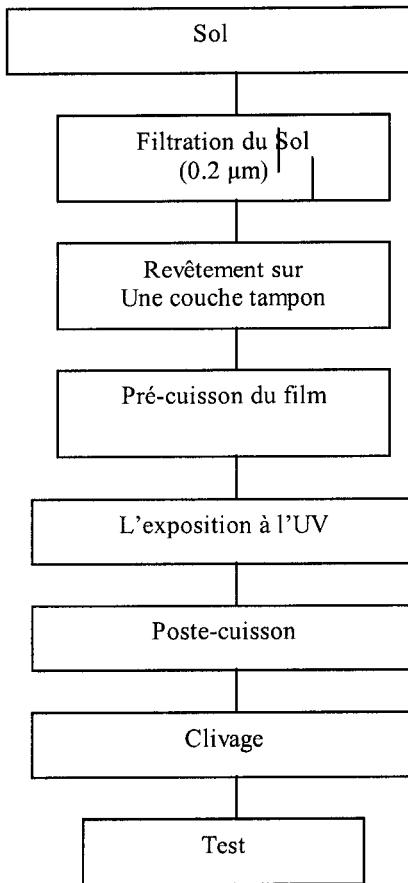
de lui faire subir une filtration à travers un filtre de  $0.2 \mu m$ , ainsi est obtenu le sol-gel final.

La procédure de fabrication des guides d'ondes plans consiste en quatre étapes: la préparation de sol, le revêtement (*dip-coating*), l'exposition à l'UV et le recuit final. La **Figure II-1** en donne un résumé, alors que les détails des quatre étapes de fabrication sont expliqués ci-dessous:

Les substrats utilisés sont nettoyés avec un détergent puis rincés avec un jet d'eau ionisée et ensuite, ils sont trempés dans une solution tiède de trichloroéthylène durant 10 minutes. Nous les rinçons une autre fois à l'acétone et à l'isopropanole avant de les faire sécher avec de l'azote.

Les films minces sont déposés, à différentes vitesses de revêtement, sur des substrats  $SiO_2$  (*Nova Electronique Materials, Richardson, TX*) préparés selon la méthode que nous venons de décrire. Ils seront immédiatement cuits pendant *60 minutes* afin de les durcir avant de les exposer à l'UV. Cette étape est nécessaire afin que les films ne collent pas au masque au moment de l'exposition. Le système d'exposition UV de *Oriel (87000 séries)* est employé pour polymériser les substitutions vinyles.

L'exposition du sol-gel à l'UV cause la polymérisation des substituants vinyles monomères et, en conséquence, l'indice de réfraction des régions exposées à l'UV augmente relativement aux régions non exposées. Finalement, les films exposés sont recuits à  $130^{\circ}C$  pendant une heure afin de bien solidifier le film et de se débarrasser des molécules d'eau ainsi que des solvants organiques.

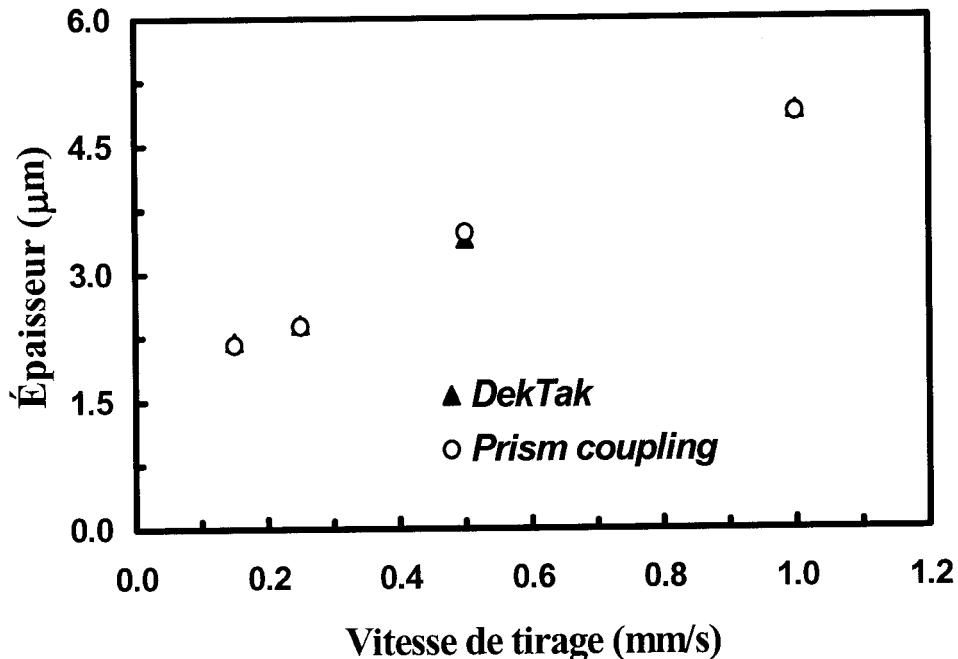


**Figure II-1** : les étapes de fabrication d'un guide d'ondes plan.

### II.3 Résultats et discussions

Les couches minces du sol-gel, déposées sur le substrat, ont un indice de réfraction supérieur à celui de ce dernier ce qui permet d'exciter des modes guidés dans les guides plans. La méthode de couplage par prisme avec le laser *He-Ne* émettant à  $0.632 \mu m$  est utilisée pour déterminer l'indice de réfraction et l'épaisseur des films.

La **Figure II-2** montre le résultat de mesure de l'épaisseur par la méthode du prisme coupleur et par contact - *DekTak (Sloan DekTak auto-levelling profilometer)*-. La comparaison des résultats montre un excellent accord entre les deux méthodes de mesure de l'épaisseur du film et confirme que la lumière UV pénètre jusqu'au substrat. Cette affirmation diffère de nos processus antérieurs où la pénétration de la lumière UV était limitée à environ  $3.5 \mu m$  dans la couche du sol-gel.

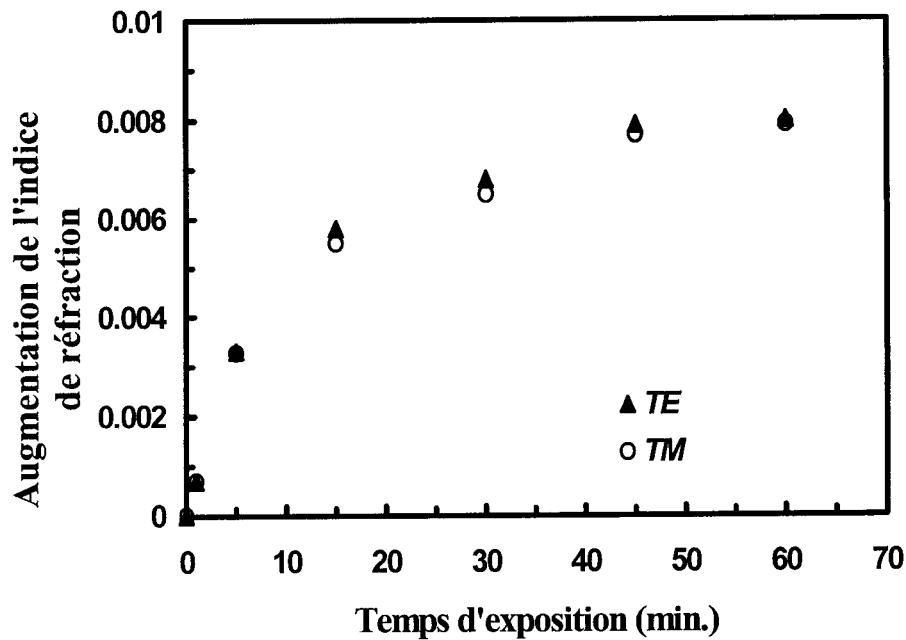


**Figure II-2 :** Variation de l'épaisseur de la couche mince de verre à sol-gel avec la vitesse de tirage.

La pénétration plus profonde de l'UV dans le nouveau sol-gel est due à la bonne transparence de ce dernier et à la haute intensité d'émission de la nouvelle lampe UV. On utilise la fonction à saut d'indice dans la caractérisation par couplage par prisme des films exposés et non exposés.

#### II.3.1.1 L'effet de l'exposition à la lumière UV

L'indice de réfraction de la couche mince de sol-gel, avant exposition à l'UV, est de 1.489 et 1.487 pour les polarisations *TE* et *TM* respectivement. Après exposition à la lumière UV, l'indice de réfraction augmente d'une quantité  $\Delta n$  et le maximum de  $\Delta n$  est atteint après 45 minutes d'exposition UV. Au-delà de ce temps,  $\Delta n$  se stabilise à 0.008 comparé au film sol-gel non exposé à l'UV. La **Figure II-3** montre la variation de  $\Delta n$  en fonction du temps d'exposition à l'UV.

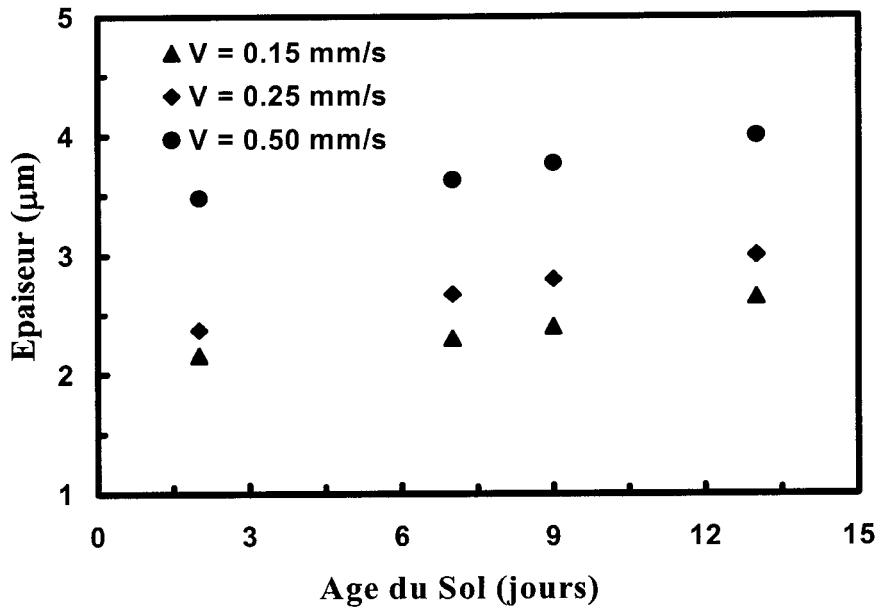


**Figure II-3 :** Augmentation de l'indice de réfraction,  $\Delta n$ , dans le film sol-gel en fonction du temps d'exposition à la lumière UV.

### II.3.1.2 Effets dûs au vieillissement

Pour étudier l'effet du vieillissement du sol-gel sur l'épaisseur du film, nous avons fabriqué des films d'une façon périodique pendant deux semaines à partir d'une même solution. Nous avons pris des précautions pour bien conservée la solution à l'obscurité après les différentes opérations de revêtement ou de dépôt du sol sur le substrat  $SiO_2$ .

La **Figure II-4** montre l'effet de l'âge du sol-gel sur l'épaisseur du film correspondant à différentes vitesses de revêtements. Les résultats montrent qu'il y a une légère augmentation de l'épaisseur du film avec l'âge du sol.



**Figure II-4 :** Variation de l'épaisseur du film avec l'âge de sol.  $V$  est la vitesse de tirage.

### II.3.1.3 Combinaison des effets de la température de cuisson et d'une exposition à la lumière ultra-violette

Nous nous sommes intéressés aussi à connaître l'effet de la lumière ambiante et de la température sur les films du sol-gel exposés et non-exposés à l'UV. Pour cela, nous avons préparé quatre échantillons de films, en utilisant la même vitesse de revêtement, mais à des températures de recuit différentes, variant de  $130^{\circ}\text{C}$  à  $160^{\circ}\text{C}$ . Par la suite, les quatre échantillons ont été exposés à la lumière *UV* pendant une heure. L'observation de l'indice de réfraction a révélé qu'il subit une augmentation dans le cas de chaque échantillon et la variation  $\Delta n$  de sa valeur, en fonction de la température de recuit, est représentée dans la

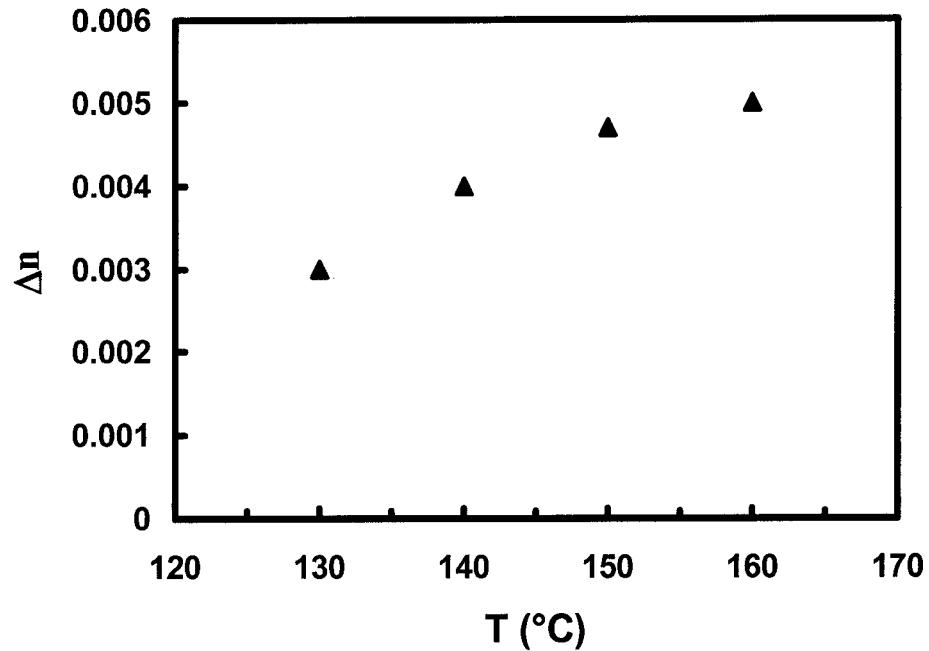
**Figure II-5.**

Nous avons fait des observations sur d'autres échantillons qui ont été exposés uniquement à la lumière ambiante, dans le laboratoire, pendant une durée de quatre mois. Pendant cette période, la constante de propagation des modes guidés dans ces guides a été mesurée de façon périodique. Les mesures ont montré qu'il n'y a pas de changement des propriétés optiques des guides exposés et non exposés dans le temps.

D'autres expériences ont été développées afin d'étudier l'effet du temps d'exposition et la température sur les films sol-gel. Six nouveaux échantillons ont été préparés en utilisant la même vitesse de revêtement. Aussi, trois d'entre eux étaient recuits à  $130^{\circ}\text{C}$  et les trois autres à  $160^{\circ}\text{C}$ , mais seulement quatre échantillons parmi les six ont été exposés à l'UV après le recuit (ils correspondent à la colonne 7 du **Tableau II-1**). Ici encore, nous avons remarqué une augmentation de l'indice de réfraction, la variation  $\Delta n$  de sa valeur a été mesurée dans le cas des six échantillons et les résultats sont montrés dans la colonne 8 du **Tableau II-1**. Ces résultats indiquent que l'augmentation de la température de recuit conduit à l'augmentation de l'indice de réfraction du film (voir les échantillons 1,2,3 et 4); La seconde exposition à l'UV augmente le  $\Delta n$  du film (voir échantillon 3 et 4), mais  $\Delta n$  reste faible par rapport à celle des films exposés (voir différence entre échantillon 1 et 2); La seconde exposition à l'UV augmente la valeur de l'indice de réfraction des films. Ceci implique que si le temps de la première exposition à l'UV était plus long, des guides d'ondes avec un indice de réfraction plus grand pourraient être achevés.

**Tableau II-1 :** Les paramètres de fabrication des guides d'ondes plans et les résultats de la caractérisation.

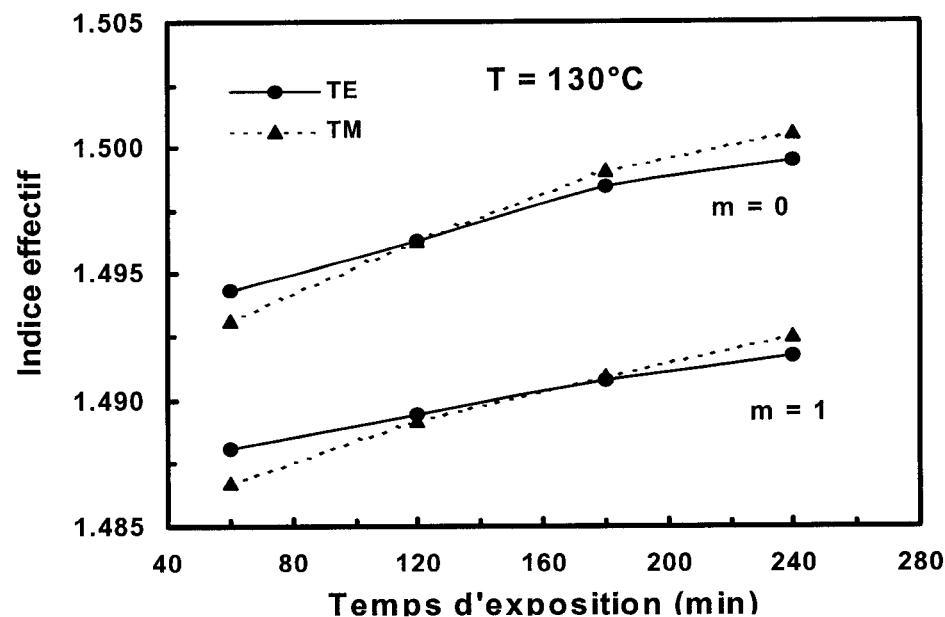
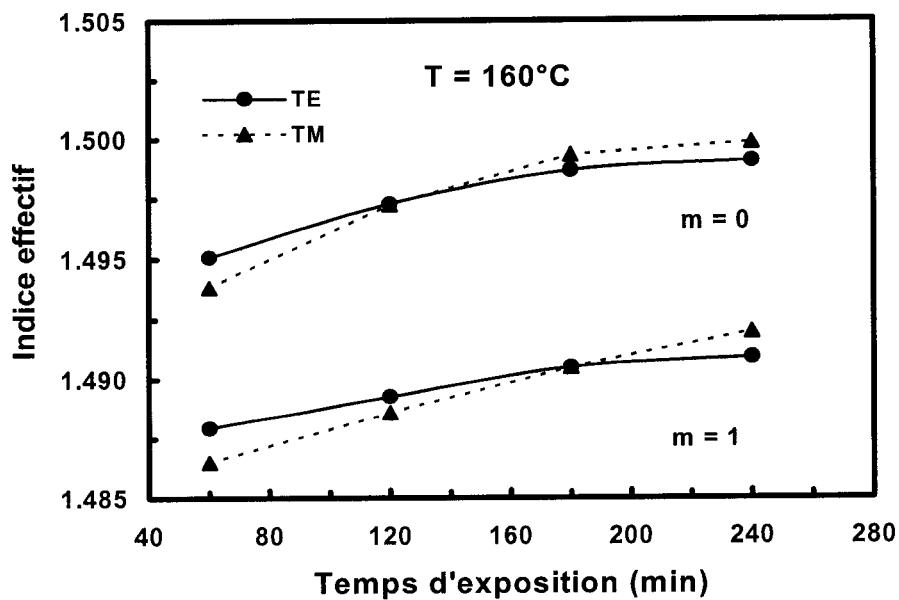
# Échantillon	Pré-cuisson		Lumière UV	Post-cuisson		Lumière UV	$\Delta n$
	Temps (min)	Températ ure ( $^{\circ}\text{C}$ )	Temps (min)	Temps (min)	Température ( $^{\circ}\text{C}$ )	Post-exposition (min)	
1	60	100	60	60	130	-	0.008
2	60	100	60	60	160	-	0.0093
3	60	100	-	60	130	60	0.003
4	60	100	-	60	160	60	0.0045
5	60	100	60	60	130	60	0.0087
6	60	100	60	60	160	60	0.0105



**Figure II-5 :** Augmentation de l'indice de réfraction,  $\Delta n$ , en fonction de la température de post-recuit Les films ont été exposés à la lumière UV pendant une heure.

#### II.3.1.4 Biréfringence

Les guides d'ondes sol-gel sont biréfringents. C'est une propriété non désirable dans plusieurs applications. Nous avons réalisé quelques expériences pour éliminer la biréfringence dans les guides d'ondes sol-gel. Nous avons trouvé que la combinaison de la température de recuit et la seconde exposition à l'UV peut être utilisée pour obtenir des guides d'ondes sol-gel avec une même constante de propagation pour les deux polarisations *TE* et *TM*. C'est l'observation de deux nouveaux échantillons de films de  $3.5 \mu m$  d'épaisseur, nouvellement préparés, qui nous a permis d'aboutir à ce résultat. Les deux échantillons sont exposés à la lumière UV pendant une heure, puis l'un est recuit à  $130 {}^0C$  et l'autre à  $160 {}^0C$ . Les indices effectifs du mode fondamental et celui du mode de premier ordre ont été mesurés. Ensuite, les deux échantillons ont été exposés trois fois de suite à l'UV pendant une heure. Après chaque exposition, l'indice effectif des deux premiers modes est mesuré. Les **Figure II-6** et **Figure II-7** montrent les résultats des



mesures. Pour les deux échantillons, la biréfringence du mode fondamental et celle du mode de premier ordre sont supprimées.

Pour l'échantillon recuit à  $130\text{ }^{\circ}\text{C}$ , la biréfringence est éliminée pendant un temps de seconde exposition à l'UV, plus court par rapport à l'autre échantillon ( $160\text{ }^{\circ}\text{C}$  recuit). Pour le mode du premier ordre, la biréfringence est éliminée en un temps d'exposition plus long par rapport à celui du mode fondamental.

### II.3.2 Conclusion

Nous avons développé un nouveau sol-gel organoaluminophosphate pour la fabrication des éléments optiques destinés à l'optique intégrée. Ce nouveau matériau présente l'avantage que l'épaisseur et l'indice de réfraction sont reproductibles, ce qui rend le matériau et le processus attractifs pour la fabrication des composants optiques. Les résultats montrent qu'il n'y a pas de variation significative de l'épaisseur et de l'indice de réfraction avec l'âge du sol-gel. Quant à l'indice de réfraction, il croît et la variation  $\Delta n$  reste inchangée pour le même temps d'exposition à l'UV, quel que soit l'âge du sol-gel.

Après le recuit, l'indice de réfraction reste inchangé sous l'effet de la lumière du laboratoire (lumière blanche). Cependant, si le film est exposé à une intense lumière UV, l'indice de réfraction augmente. Cette augmentation dépend de la température de recuit. Les films sol-gel sont biréfringents mais nous avons montré qu'il est possible d'éliminer cette biréfringence dans les guides d'onde en combinant l'effet de temps de la seconde exposition à l'UV et de la température de recuit.

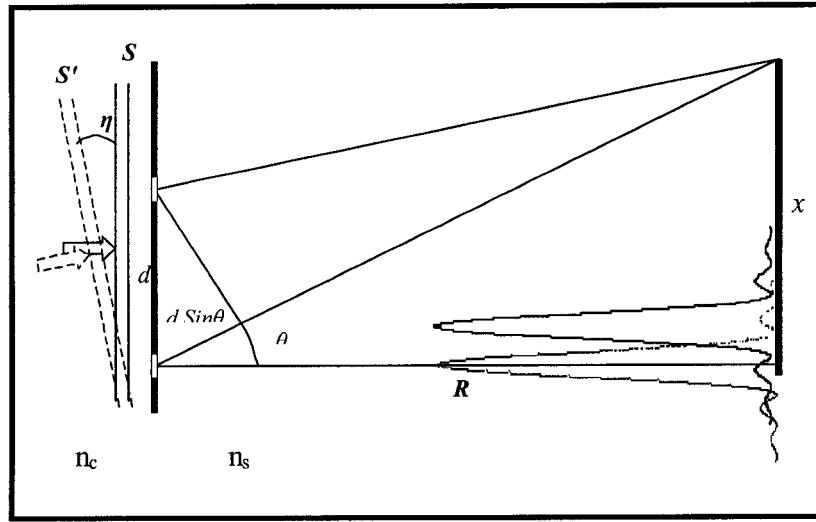
## CHAPITRE III. THÉORIE DU RÉSEAU SÉLECTIF PLANAIRES (*AWG*)

### III.1 Présentation du réseau sélectif planaire *AWG*

Nous construisons un réseau sélectif planaire *AWG* dont la fonctionnalité principale est, tout d'abord, basée sur l'interférence discordante (*a grating interference*), à partir d'un réseau constitué d'un grand nombre de fentes séparées par une même distance de telle sorte que le plan image (*image line*) soit loin du plan des fentes (*plane of slits*) [Sal. B.]. Lorsqu'une onde cohérente et monochromatique arrive avec un angle d'incidence  $\eta$  dans le plan des fentes, chacune des fentes devient comme une source avec une différence de phase initiale constante par rapport à la fente adjacente comme le montre la **Figure III-1**. La différence de phase causée par l'inclinaison initiale du plan d'onde et par les différentes distances des chemins optiques empruntés par la lumière qui traverse chaque fente, crée une interférence dans le plan image (*image line*). L'équation de dispersion d'un tel réseau de fentes est [Tak. H. 95]:

$$n_c \Delta L + n_s d \sin \theta = m \lambda \quad \text{Eq. III-1}$$

où  $m = \dots, -1, 0, 1, \dots$ ,  $k$  est le nombre d'onde,  $\Delta L$  est la différence en longueur entre deux guides d'ondes adjacents du réseau,  $n_c$  et  $n_s$  représentent les indices de réfraction avant et après la fente respectivement, c'est à dire dans le guide du réseau et dans la région du coupleur en étoile (*slab region*) respectivement,  $\theta$  définit la position angulaire dans le plan image.



**Figure III-1 :** Schéma du phénomène d'interférence lorsque la lumière cohérente traverse deux fentes séparées par une distance  $d$  et que le front d'onde de fait un angle  $\eta$  avec le plan des deux fentes.

Quand le front d'onde initial atteint le plan des fentes sans inclinaison ( $\eta = \Delta L = 0$ ), la tache la plus intense de la lumière (*the most intense spot*), qui correspond à la focalisation maximale de la lumière, sera à  $m = 0$  pour toutes les longueurs d'ondes. Ceci signifie que le réseau des guides n'est pas en mesure de discriminer les longueurs d'onde pour  $m = 0$ . Alors, pour pouvoir discriminer les longueurs d'onde, le front d'onde de l'onde incidente devrait former un angle  $\eta$  non nul avec le plan des fentes. Cependant, en augmentant  $\eta$ , l'emplacement  $m = 0$  pour deux longueurs d'ondes différentes n'est pas le même.

Pour  $\theta = 0$ , et pour un  $\Delta L$  donné, l'équation III-1 devient:

$$n_c \Delta L = m \lambda_0, \quad \text{Eq. III-2}$$

où  $\lambda_0$  est la longueur d'onde focalisée au point  $\theta = 0$ .

En variant  $\lambda$  à  $\theta = 0$  dans l'équation III-2, on verra une variation périodique d'intensité au fur et à mesure qu'on parcourt les différents ordres ( $m$ ) du réseau, qui se traduit par les équations suivantes:

$$n_c \Delta L = \dots = (m_0 - 1)(\lambda_0 + FSR) = m_0 \lambda_0 = (m_0 + 1)(\lambda_0 - FSR) = \dots, \quad \text{Eq. III-3}$$

où *FSR* «*free spectral range*» est la période en longueur d'onde de la réponse à la sortie de l'*AWG*. Dans l'équation ci-dessus, pour l'ordre  $m_0 - 1$ , la longueur d'onde est  $\lambda_0 + FSR$ . La plus faible longueur d'onde focalisée est  $\lambda_0 - FSR$ , et elle correspond à l'ordre  $m_0 + 1$ , et ainsi de suite.

Nous pouvons maintenant trouver l'ordre du réseau en utilisant l'équation III-3:

$$(m_0 - 1)(\lambda_0 + FSR) = (m_0 + 1)(\lambda_0 - FSR) \quad \text{Eq. III-4}$$

$$m_0 = \frac{\lambda + FSR}{FSR} \quad \text{Eq. III-5}$$

Puisque  $m_0$  est entier, alors

$$m_0 = \text{int}\left(\frac{\lambda_0 + FSR}{FSR}\right), \quad \text{Eq. III-6}$$

où  $\text{int}\left(\frac{\lambda_0 + FSR}{FSR}\right)$  désigne la partie entière de  $\frac{\lambda_0 + FSR}{FSR}$ .

D'après l'équation III-1, et comme la longueur d'onde du front d'onde varie à l'entrée, la réponse à la sortie va varier aussi, puisqu'elle est fonction de la longueur d'onde. La variation de la réponse du composant *AWG* qui correspond à un changement graduel de la longueur d'onde est donnée par l'équation III-8,

$$n_c \Delta L + n_s d \sin\theta = m\lambda \quad \text{Eq. III-7}$$

$$\frac{\Delta(n_c \Delta L)}{\Delta\lambda} + \frac{\Delta(n_s d \sin\theta)}{\Delta\lambda} = m \quad \text{Eq. III-8}$$

Puisque  $\Delta L$  et  $d$  sont des dimensions physiques, alors elles ne dépendent pas de la longueur d'onde et si  $\Delta\lambda$  est de l'ordre de nanomètre, on aura:

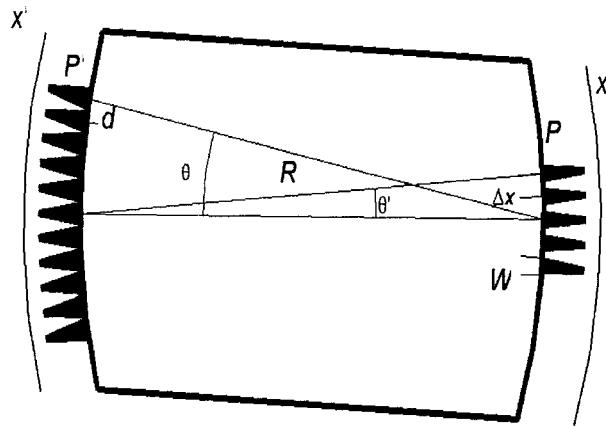
$$\frac{\Delta n_c}{\Delta\lambda} \approx \frac{\Delta n_s}{\Delta\lambda} \approx 0, \quad \text{Eq. III-9}$$

et par conséquent l'équation III-8 devient:

$$dn_s \frac{\Delta\theta}{\Delta\lambda} = m. \quad \text{Eq. III-10}$$

Dans l'équation ci-dessus,  $\cos\theta$  est de l'ordre de 1 car en considère que  $\theta$  est très inférieur à 1.

La **Figure III-2** schématisé l'interférence à deux dimensions dans la région de coupleur en étoile d'un *AWG*, quand le plan sur lequel l'onde se propage est parallèle au substrat. Les paramètres  $n_c$  et  $n_s$  devraient alors représenter respectivement l'indice effectif du mode fondamental de guide canal et celui de guide plan (la région de coupleur en étoile) (*slab*.). Chacune des fentes devrait aussi être une région de jonction (discontinuité) entre le guide canal (à gauche de la fente) et le guide plan (*slab*.)) (à droite de la fente). Dans ce cas, pour séparer différentes longueurs d'ondes, à chaque maximum de premier ordre, il faudra un guide canal pour guider l'onde vers l'extérieur de la région de sortie du guide plan comme montré dans La **Figure III-2**.



**Figure III-2 :** schéma de l'interférence dans la région du coupleur en étoile (Slab.). Le plan image et le plan des fentes sont deux cercles dont le centre de l'un est localisé sur la circonférence de l'autre

Pour bien contrôler les points de focalisation, l'entrée et la sortie du coupleur en étoile formées respectivement par les sorties des guides du réseau et l'entrée des guides d'onde de sortie d'*AWG*, ont une forme circulaire. Le centre du cercle de la région d'entrée est localisé sur circonférence du cercle de la région de sortie et vice-versa comme le schématise La **Figure III-2**.

En tenant compte de la valeur de  $\Delta\theta$  tirée de l'équation:

$$\Delta\theta = \frac{\Delta x}{R}, \quad \text{Eq. III-11}$$

alors l'équation III-10 peut s'écrire comme suit:

$$R = \frac{dn_s \Delta x}{m \Delta \lambda} \quad \text{Eq. III-12}$$

Les quantités  $R$  et  $\Delta L$  sont les paramètres physiques facilement ajustables pour un modulateur de phase (*phaser*).  $\Delta L$  peut être déduit de l'équation aux frontières de l'équation différentielle III-8 dont l'équation III-1 est une solution.

Le paramètre standard dans l'industrie est la longueur d'onde centrale, celle-ci définit la longueur d'onde destinée pour le guide d'onde canal centrale à la sortie de l'*AWG*. Cette condition est utilisée pour résoudre l'équation aux frontières.

$$n_c \Delta L = m \lambda_0, \quad \text{Eq. III-13}$$

où  $\lambda_0$  est la longueur d'onde centrale, et on prend  $\theta=0$  pour cette longueur d'onde.

### III.2 Procédure conceptuelle d'un *AWG*

La conception d'un *AWG* a deux aspects: dynamique et physique. L'aspect dynamique de la conception correspond à l'obtention des paramètres physiques  $R$ ,  $\Delta L$ ,  $\Delta x$  et  $d$ , tandis que l'aspect physique de la conception est relié à la forme géométrique des motifs (*physical layout*) qui seront tracés sur un masque photo-lithographique.

Les paramètres indispensables pour la conception d'un *AWG* sont les paramètres du matériau, les paramètres spécifiques du composant *AWG* et ceux de conception.

#### III.2.1 Les paramètres du matériau

Les paramètres du matériau, indispensables à la conception d'un *AWG*, sont les indices de réfractions  $n_{in}$  et  $n_{out}$  respectivement du guide canal et de la couche gaine environnante.

#### III.2.2 Paramètres spécifiques du composant *AWG*

En plus des indices de réfraction des matériaux, nous avons besoin de définir les paramètres spécifiques du composant *AWG* qui nous intéresse, qui sont:

- $\Delta \lambda$  qui est l'espacement entre les canaux. Elle représente la résolution en longueur d'onde dans le réseau.
- $N$  qui est le nombre de canal à la sortie.
- $\lambda_0$  qui est la longueur d'onde centrale.

### III.2.3 Paramètres de conception

Lorsque les paramètres du matériau sont fixes et les spécifications du composant *AWG* sont définies, le traçage de motif *AWG* nécessite l'optimisation des paramètres du design schématisés dans la **Figure III-2** et qui sont les suivants:

- $\Delta x$  : est la distance qui sépare le centre de deux guides canal adjacent de sortie au niveau du guide plan (*slab*.).
- $d$  : est la distance qui sépare le centre de deux guides transmetteurs canal adjacent au niveau de guide plan (*slab*.).
- $N_s$  : est l'indice effectif du guide plan.
- $N_c$  : est l'indice effectif du canal
- $M$  : est le nombre des guides canaux dans le réseau
- $m$  : est l'ordre de réseau
- $R$  : est le rayon du guide plan (*slab*)
- $\Delta L$  : est la différence en longueur entre deux guides canal adjacent dans le réseau.

## III.3 Étapes de conception

### III.3.1 Dimensions des guides canaux

Il est fondamental, dans la plupart des cas, d'avoir une structure symétrique du guide, et ce pour deux raisons:

- a- Le profil du mode fondamental devra ressembler à celui de la fibre (circulaire), pour réduire les pertes du couplage.
- b- Une structure symétrique, pour des matériaux à très faible biréfringence, est indépendante de la polarisation. Ce qui conduit à des structures dont la perte due à la polarisation est très faible.

De plus, la fibre de couplage étant considérée mono-mode, les modes paires des guides canaux devraient automatiquement s'annuler au moment du couplage. C'est la raison pour laquelle la dimension  $w$  du guide est de sorte que ce dernier supporte deux modes au maximum. Par ailleurs, si le guide canal supporte deux modes, le design se fait de telle

façon que le second mode ne soit pas excité et que seul le mode fondamental, dont l'indice effectif le long de l'axe  $x$  est  $n_s$ , soit guidé.

La méthode de l'indice effectif [Burns. W. 75][ Nichihara. H. 85] permet de réduire le problème d'une structure à trois dimensions à celui d'une structure à deux dimensions. Cependant, un guide canal peut être assimilé à un guide plan vertical avec un même indice de réfraction extérieur et intérieur égal à l'indice effectif du mode fondamental du guide plan horizontal.

### III.3.2 Ordre du réseau ( $m$ )

Comme cité ci-dessus,  $FSR$  (*free spectral range*) est la période de la réponse en longueur d'onde à la sortie d'un *AWG*. Afin d'éviter le chevauchement de la réponse optique pour deux périodes consécutives, le  $FSR$  doit satisfaire à l'inéquation suivante:

$$FSR \geq |\lambda_{DernierCanal} - \lambda_{premierCanal}|. \quad \text{Eq. III-14}$$

Il est important de noter que, plus la  $FSR$  est grande, plus l'incrément  $\Delta L$  en longueur est petit. Cependant, un petit  $\Delta L$  peut générer un stress important au niveau du réseau lors du processus de micro-fabrication. D'autre part, avec une  $FSR$  très faible, il y aura possibilité d'une superposition de la réponse optique des canaux due aux faibles variations de la micro fabrications.

Une fois la  $FSR$  fixée, l'ordre du réseau est calculé à partir de l'équation III-8.

$$m = \text{int}\left(\frac{\lambda_0 + FSR}{FSR}\right). \quad \text{Eq. III-15}$$

### III.3.3 Longueur de guide plan en étoile ( $R$ )

La distance,  $\Delta x$ , qui sépare les centres des canaux à la sortie du guide plan en étoile et  $d$ , séparant les centres des canaux dans le réseau au niveau de l'entrée du guide plan en étoile, sont fixées pour obtenir la longueur du guide plan en étoile exprimée par l'équation III-12.

$$R = \frac{dn_s \Delta x}{m \Delta \lambda}, \quad \text{Eq. III-16}$$

et qui est suffisante pour satisfaire l'approximation du champ lointain (*far field approximation*) dans le guide plan en étoile exprimé par la relation III-17.

$$\frac{\Delta x^2}{\lambda R} \ll 1 \quad \text{Eq. III-17}$$

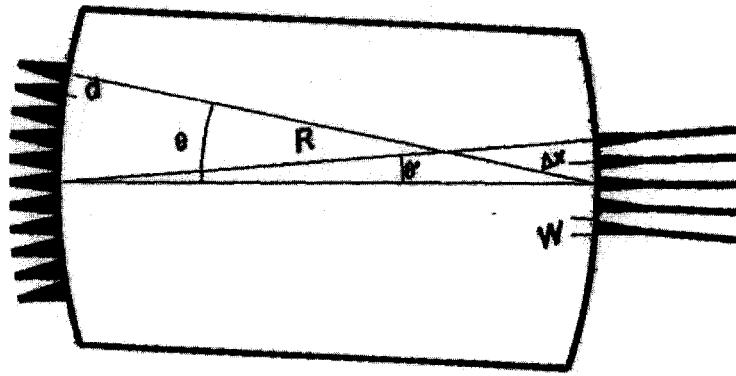
### III.3.4 Longueur d'incrémentation ( $\Delta L$ )

En utilisant la valeur de la longueur d'onde centrale  $\lambda_0$ , l'indice de réfraction  $n_c$  du guide canal et l'ordre du réseau  $m$ , la longueur d'incrémentation  $\Delta L$  s'obtient par l'équation ci-dessous:

$$\Delta L = \frac{m \lambda_0}{n_c}. \quad \text{Eq. III-18}$$

## III.4 Simulation

Considérons la géométrie de la **Figure III-3**, où le rayon  $R$  de chacun des deux cercles opposés traverse le centre de l'autre cercle, et considérons deux points  $P$  et  $P'$  de coordonnées  $\theta$  et  $\theta'$  respectivement. Pour  $\theta$  et  $\theta'$  petit, la distance  $D$  entre les deux points  $P$  et  $P'$  est donnée par [Dra. C. 89]



**Figure III-3 :** Les paramètres géométriques du deuxième guide d'onde plan en étoile (*second slab region*).

$$D = R(1 + \sin\theta \sin\theta'). \quad \text{Eq. III-19}$$

Si au point  $P$  on place une source d'amplitude unitaire, le résultat de la réponse au point  $P'$  est:

$$U = \frac{e^{jkD}}{\sqrt{j\lambda R}} = \frac{e^{jkR}}{\sqrt{j\lambda R}} e^{jkr \sin\theta \sin\theta'}. \quad \text{Eq. III-20}$$

Notons que,

$$\sin\theta = \frac{x}{R}, \quad \text{Eq. III-21}$$

et que

$$\sin\theta' = \frac{x'}{R}. \quad \text{Eq. III-22}$$

Respectivement.

Le terme,  $kR \sin\theta \sin\theta'$  peut être écrit comme suit:

$$2\pi w'u = 2\pi wu' \quad \text{Eq. III-23}$$

où

$$w = \frac{d \sin\theta}{2\lambda}, \quad \text{Eq. III-24}$$

$$w' = \frac{\Delta x \sin\theta'}{2\lambda}, \quad \text{Eq. III-25}$$

$$u = \frac{2x}{\Delta x}, \quad \text{Eq. III-26}$$

et

$$u' = \frac{2x'}{\Delta x}. \quad \text{Eq. III-27}$$

Cependant,  $U$  peut s'écrire comme:

$$U = \frac{e^{jkr}}{\sqrt{j\lambda R}} e^{j(2\pi w'u - 2\pi u'w)}. \quad \text{Eq. III-28}$$

La transformée de Fourier du champ total résultant de la distribution de la source, sur le cercle receveur est une nette multiplication de la réponse par la transformé de Fourier de la source. Le paramètre  $A$  est un facteur de normalisation.

$$E = A\psi(x). \quad \text{Eq. III-29}$$

Le calcul de la transformée de Fourier devient:

$$\bar{E}(v'_x) = \int_{\frac{-\Delta x}{2}}^{\frac{+\Delta x}{2}} E(x) e^{2\pi j v'_x x} dx, \quad \text{Eq. III-30}$$

où  $v'_x$  est la fréquence spatiale, nombre de cycle par longueur. [cycles/length]

En remplaçant  $E(x)$  par  $A\psi(x)$  dans l'équation III-30,  $\bar{E}(v'_x)$  s'écrit:

$$\bar{E}(v'_x) = A \int_{\frac{-\Delta x}{2}}^{\frac{+\Delta x}{2}} \psi(x) e^{2\pi j v'_x x} dx. \quad \text{Eq. III-31}$$

Notons aussi que

$$v'_x = \frac{\sin \theta'}{\lambda}, \quad \text{Eq. III-32}$$

et

$$x = \frac{\Delta x u}{2}, \quad \text{Eq. III-33}$$

En tenant compte de ces deux dernières égalités, nous aurons:

$$\bar{E}(v'_x) = \frac{\Delta x A}{2} \int_{\frac{-\Delta x}{2}}^{\frac{+\Delta x}{2}} \psi(u) e^{2\pi j \frac{\Delta x u \sin \theta'}{2\lambda}} du \quad \text{Eq. III-34}$$

$$= \frac{\Delta x A}{2} \int_{\frac{-\Delta x}{2}}^{\frac{+\Delta x}{2}} \psi(u) e^{2\pi j w' u} du \quad \text{Eq. III-35}$$

$$= A \int_{-1}^1 \psi(u) e^{2\pi j \frac{\Delta x u \sin \theta'}{2\lambda}} du. \quad \text{Eq. III-36}$$

Le facteur de normalisation  $A$  est déterminé comme suit:

$$A^2 = \frac{1}{\int_{-\infty}^{+\infty} |\psi(x)|^2 dx} \quad \text{Eq. III-37}$$

$$= \frac{2}{\Delta x \int_{-\infty}^{+\infty} |\psi(u)|^2 du}. \quad \text{Eq. III-38}$$

Alors la transformée de Fourier du champ total est:

$$\overline{G}(w') = U(w') \overline{E}_t(w'), \quad \text{Eq. III-39}$$

où  $t$  définie l'émetteur [*transmיסטter*]. Le coefficient de transfère du champ est :

$$\alpha = \int \overline{G}(w') E_r(u') d(u'), \quad \text{Eq. III-40}$$

$$= \frac{1}{\lambda R} \int e^{2\pi j w' u (= w u')} \overline{E}(w') \overline{E}_r(u') du', \quad \text{Eq. III-41}$$

$$= \frac{1}{\sqrt{\lambda R}} \overline{E}_t(w') \overline{E}_r(u'). \quad \text{Eq. III-42}$$

Le transfère de puissance  $T$  de l'émetteur  $P$  vers le receveur  $P'$  est:

$$T = \frac{1}{\lambda R} |\overline{E}_t(w')|^2 |\overline{E}_r(w)|^2. \quad \text{Eq. III-43}$$

L'équation ci-dessus est l'équation de Friis. En récrivant l'équation avec plus de détail, nous obtenons:

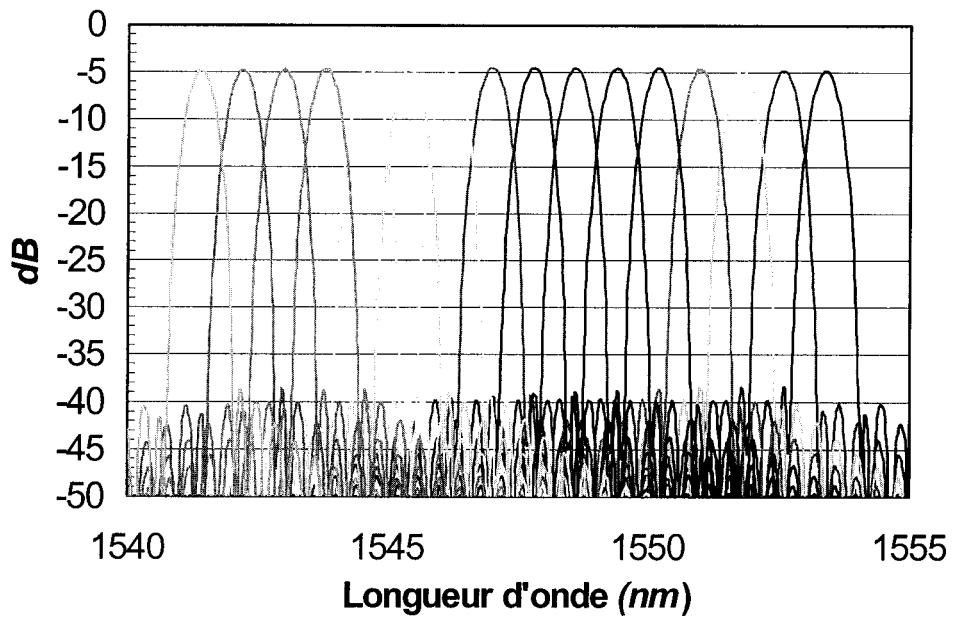
$$T = \frac{d\Delta x}{\lambda R} \eta(w') \eta'(w), \quad \text{Eq. III-44}$$

et aussi:

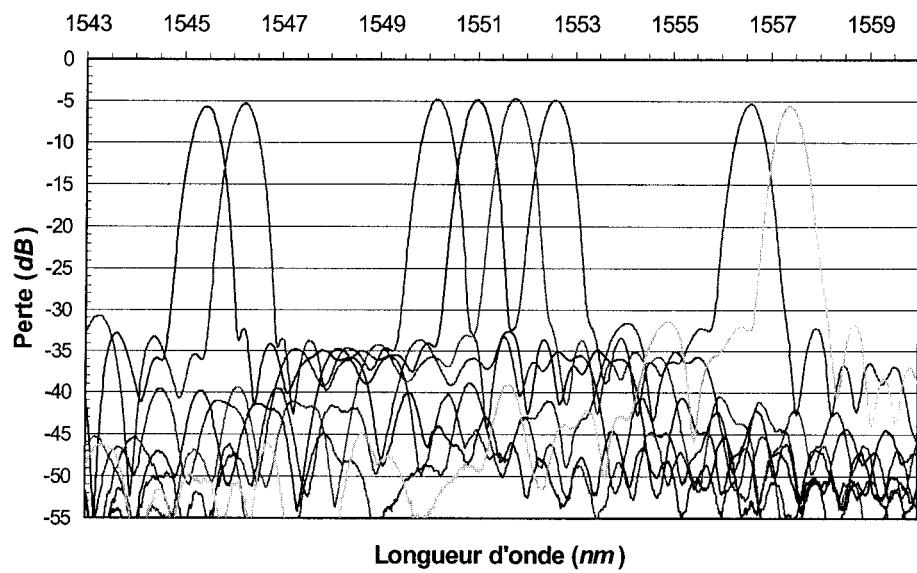
$$\begin{aligned} \eta(w') &= \frac{1}{2} \frac{\left| \bar{\psi}'(w') \right|^2}{\int_{-\infty}^{+\infty} |\psi'(u')|^2 d(u')}, & \eta'(w) &= \frac{1}{2} \frac{\left| \bar{\psi}(w) \right|^2}{\int_{-\infty}^{+\infty} |\psi(u)|^2 d(u)}, \\ \bar{\psi}(w) &= \int_{-1}^{+1} \psi(u') e^{2\pi j w u'} du', & \bar{\psi}'(w') &= \int_{-1}^{+1} \psi'(u) e^{2\pi j w' u} du \\ w &= \frac{d \sin \theta}{2\lambda}, & w' &= \frac{\Delta x \sin \theta'}{2\lambda} \\ u &= \frac{2}{\Delta x}, & u' &= \frac{2x'}{d}. \end{aligned} \quad \text{Eq. III-45}$$

Puisque la fibre utilisée pour le couplage et le découplage est mono-mode, le seul mode de guide à considérer est le mode fondamental. Cependant, indépendamment de  $\Delta x$ , seul le profil de mode fondamental est considéré pour les fonctions  $\psi$  et  $\psi'$ . Par exemple, un *AWG* à 16 sorties est conçu, voir la **Figure III-4**, pour donner un espacement de 0.8 nm entre deux canaux adjacents et la longueur d'onde à la sortie du guide canal central est de 1547.15 nm. La réponse optique à la sortie d'un *AWG* (1x16, 100 GHz), représenté dans la **Figure III-4** est générée par l'algorithme de simulation ci-dessus.

Alors que la **Figure III-5** montre la réponse optique expérimentale d'un *AWG* (1x16, 100 GHz) que nous avons fabriqué, le matériau guide correspond au ter-polymère *SFG* tandis que les couches tampon et guide sont à la base de co-polymère *BG*.



**Figure III-4 :** la simulation d'un Demultiplexeur  $1 \times 16$  AWG avec un espacement de  $0.8 \text{ nm}$  entre deux canaux adjacents et  $1547.15 \text{ nm}$  comme longueur d'onde correspondant au guide canal central.



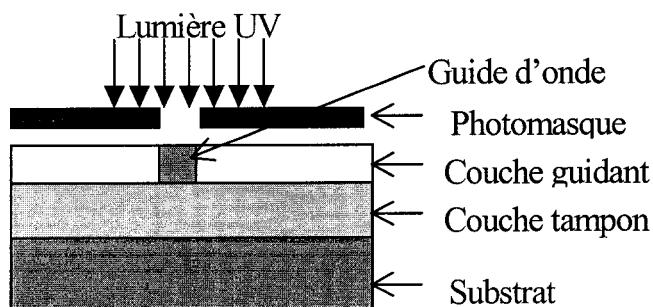
**Figure III-5:** La réponse optique expérimental d'un Demultiplexeur  $1 \times 16$  AWG avec un espacement de  $0.8 \text{ nm}$  entre deux canaux adjacents et  $1547.15 \text{ nm}$  comme longueur d'onde théorique correspondant au guide canal central.

## CHAPITRE IV. LA FABRICATION PHOTOLITOGRAPHIQUE DES GUIDES D'ONDES EN RELIEF ET DE STRUCTURE *DWDM*

### IV.1 Introduction

Dans cette section, nous décrivons la microfabrication des guides d'ondes en relief sur une couche mince de matériaux photosensibles sol-gel et/ou polymères, déposée sur un substrat de silicium ou sur une couche tampon, en utilisant un processus photolithographique simple dont les étapes seront schématisées dans la **Figure IV-2**.

Les couches minces du sol-gel sont préparées à basse température et les radiations ultraviolettes profondes qui correspondent à la raie "i" 365 nm (DUV) ont été utilisées pour imprimer les guides à travers un photomasque comme le montre la **Figure IV-1**. Le transfère du motifs se fait par contact ou par proximité. Dans la lithographie par contact ou par proximité, l'estimée de la résolution dépend du critère de Raleigh qui est basé sur l'approximation de Fraunhofer stipulant que la séparation angulaire minimum entre deux sources de lumière ponctuelles s'effectue lorsque l'intensité maximale d'une source coïncide avec le premier minimum de la seconde source.



**Figure IV-1 :** Impression d'un guide canal sur un film photosensitif par exposition aux UV à travers d'un masque photolithographique.

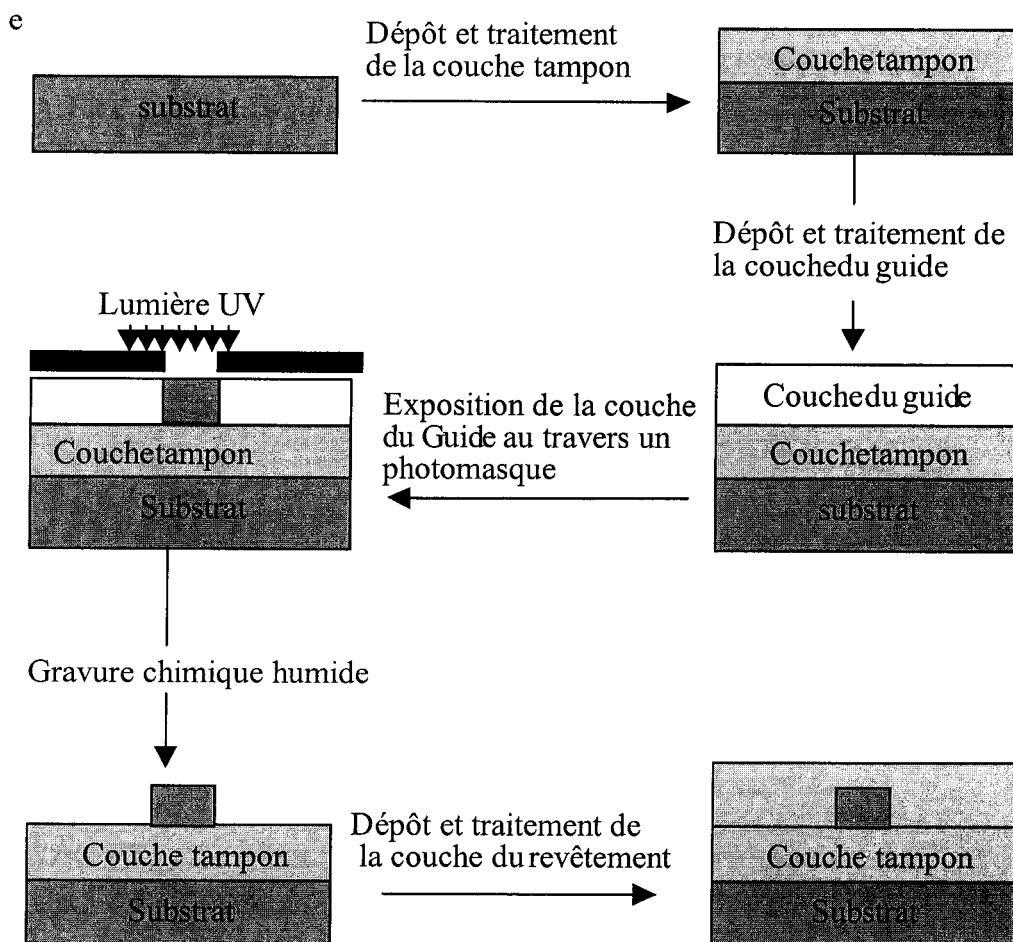


Figure IV-2 : Les étapes de la microfabrication d'un guide d'ondes en relief.

La lithographie par contact a deux avantages qui se manifestent par sa simplicité et sa haute résolution (jusqu'à  $0.25 \mu\text{m}$ ), mais elle présente aussi des inconvénients tels que l'usure rapide du masque, la nécessité d'un nettoyage fréquent du masque et le décollement du film en contact avec le masque lors de la séparation.

Les effets des paramètres de la microfabrication sur la forme et la qualité des guides d'ondes sont analysés dans les sections suivantes.

## IV.2 Guide d'ondes en relief

### IV.2.1 Étapes de la microfabrication d'un guide en relief

Les étapes relatives à la fabrication des guides en relief sont essentiellement les mêmes que dans le cas d'un guide plan à deux exceptions près. D'abord, l'exposition aux ultraviolets se fait maintenant au travers d'un masque photolithographique placé en contact avec le film ayant subi au préalable une pré-cuisson. Deuxièmement, une étape de gravure humide est rendue nécessaire pour dissoudre la partie non-exposée du film. La **Figure IV-2** montre les différentes étapes de la lithographie à contrôler pour la microfabrication des guides d'onde en relief (*ridge wave guide*) et ensuite la réalisation des composants optiques de plus en plus performants avec une grande reproductibilité.

La microfabrication d'un guide d'ondes en relief nécessite plusieurs étapes avant d'aboutir au produit final ( Voir **Figure IV-2** ). Dans cette sous-section, nous allons présenter des descriptions relatives à chacune de ces étapes.

- Revêtement de la couche tampon et du guide

L'épaisseur du guide et la qualité de la couche dépendent des conditions de la synthèse, de la technique de filtration et de la viscosité de la solution. Le choix de la technique et des conditions de revêtement est très important par exemple, un choix adéquat de la vitesse de tirage dans la technique de trempage ou bien de la vitesse de rotation dans la technique de la tournette donne de meilleurs résultats. La **Figure IV-3** montre la variation de l'épaisseur du film de sol-gel organique-inorganique 20 % Zirconium, déposée sur un substrat de silicium, en fonction de la viscosité et de la vitesse de tirage.

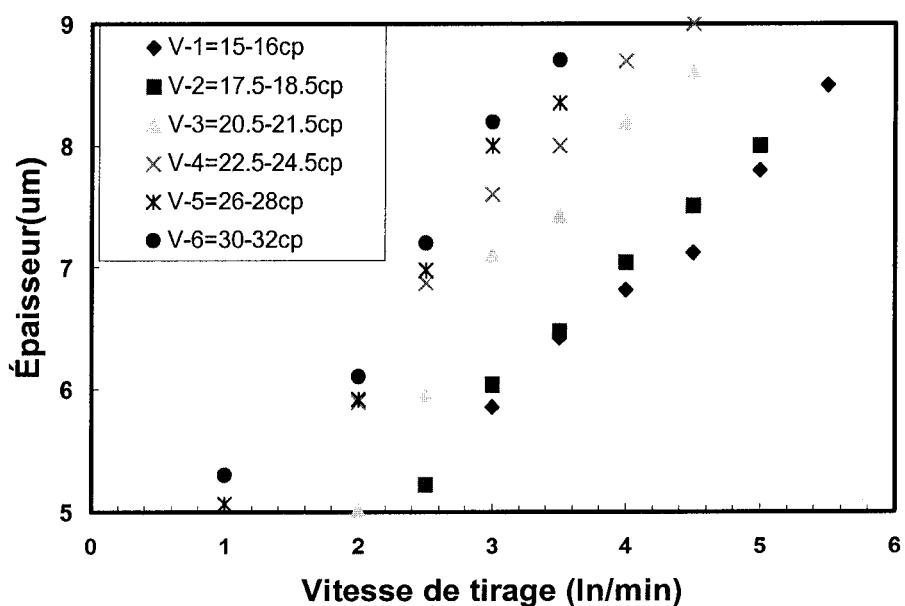
Le mécanisme de dépôt par tournette est basé sur le flux visqueux produit par la force centrifuge et l'évaporation rapide des solvants du sol durant la rotation de la tournette. Comme l'environnement du laboratoire et les différentes séquences de vitesse et d'accélération de la tournette sont facilement contrôlables, l'épaisseur du film déposé par

cette méthode est contrôlable et reproductible. L'épaisseur est inversement proportionnelle au carré de la vitesse de rotation, lorsqu'on suppose que la viscosité et la concentration de la solution restent relativement constantes [Bar. A. 72].

Cependant, le contrôle de la viscosité est difficile car, en général, elle augmente avec l'âge du sol-gel à cause de la condensation continue et du fait que les liens croisés entre les chaînes organiques se réalisent même à la température ambiante.

Les conditions de laboratoire telles que la température, l'humidité et les environnements conditionnés (Vide, Azote...) sont aussi des paramètres contribuant à la qualité de l'étalement et du revêtement ainsi qu'à l'épaisseur de la couche.

Pour des considérations optiques et techniques (microfabrication), le traitement idéal devrait rendre les couches tampon et gaine insensibles à la lumière UV et surtout résistantes à tous les développeurs chimiques utilisés lors de la gravure chimique humide.



**Figure IV-3 :** La variation de l'épaisseur de film de sol-gel organique-inorganique 20 % Zirconium en fonction de la viscosité de la solution et de la vitesse de tirage.

- Température et temps de cuisson avant l'exposition à l'UV

Dans cette étape, s'effectue l'évaporation des solvants présents dans la couche mince fraîchement déposée. Le choix de la température et le temps de cuisson avant l'exposition à l'UV sont très importants parce que ces deux paramètres déterminent les conditions favorables pour les étapes à venir, et qui doivent être comme suit:

- 1- la couche guidante doit être suffisamment sèche pour ne pas coller contre le masque lors de l'exposition et aussi pour éviter l'endommagement de la couche guidante et du masque,
- 2- la partie non exposée à l'UV doit être facilement soluble dans les développeurs utilisés pour la gravure chimique humide,
- 3- l'indice de réfraction de la couche doit être contrôlé et reproductible avec le même procédé.

- La dose et le temps de l'exposition à l'UV

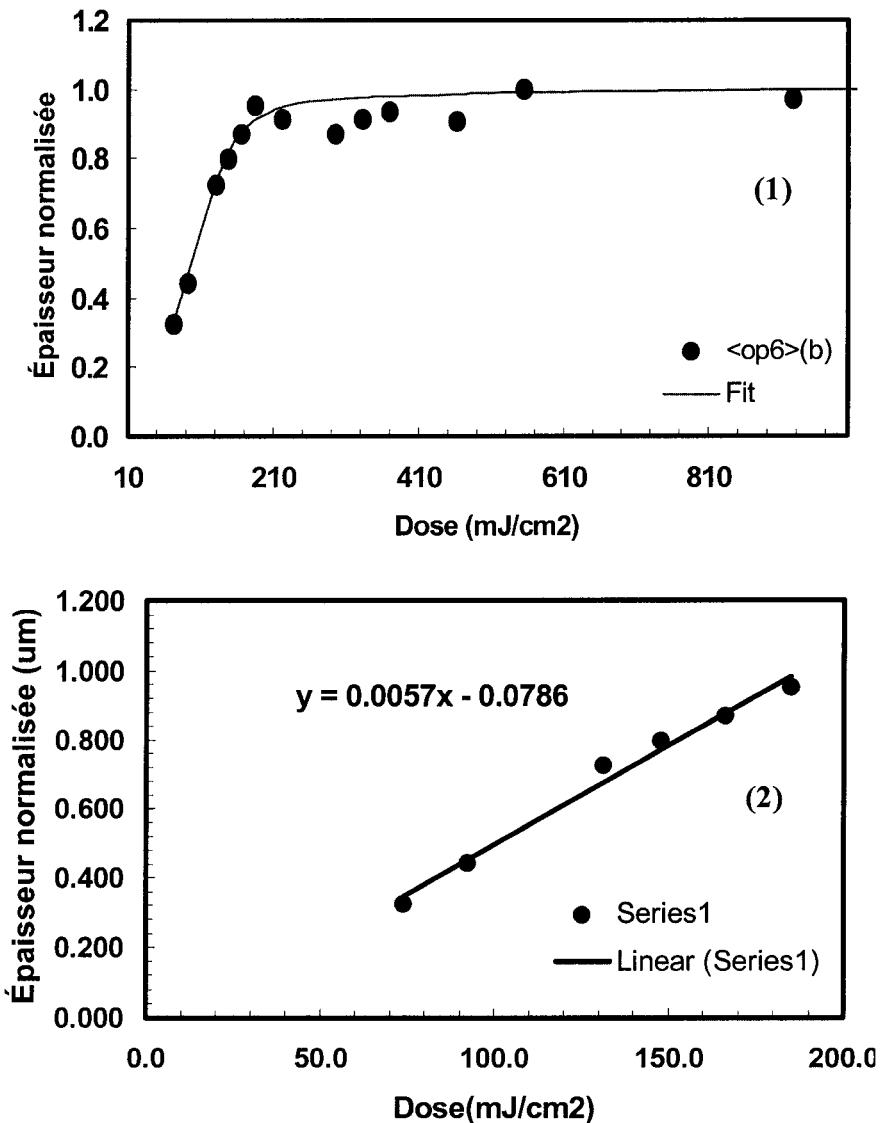
L'UV permet la polymérisation du gel organique-inorganique. Pour les polymères, l'exposition à l'UV permet la libération d'un acide qui est un catalyseur de la réticulation des chaînes de polymère via un composé réticulant comme l'époxy, par exemple.

Le temps d'exposition joue un rôle clé dans la définition plus au moins nette des parois des guides. Cette définition est généralement dépendante de la réflectivité du substrat, de l'épaisseur du film et surtout des propriétés photo-lithographique du matériau tels que la sensibilité et le contraste dont les valeurs sont déduites de la courbe de développement de ter-polymère *SFG* comme le montre la **Figure IV-4** dont les paramètres et les conditions d'expérience sont représentés dans le **Tableau IV-1**.

La sensibilité est définie par:

$$\gamma_n = \frac{1}{(\log D_g^0 - \log D_g^i)} = \left[ \log \frac{D_g^0}{D_g^i} \right]^{-1} \quad \text{Eq. IV-1}$$

Les paramètres  $D_g^0$  et  $D_g^i$  sont déduits de la partie linéaire de la courbe de développement.

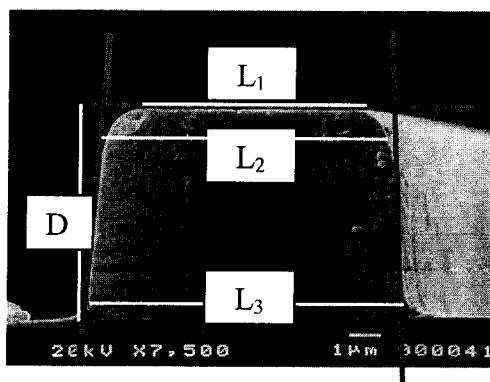


**Figure IV-4 :** (1) Représente la courbe de développement de ter-polymère selon le procédé (b) décrit dans le tableau IV-1 et (2) représente la partie linéaire de la courbe de développement (1).

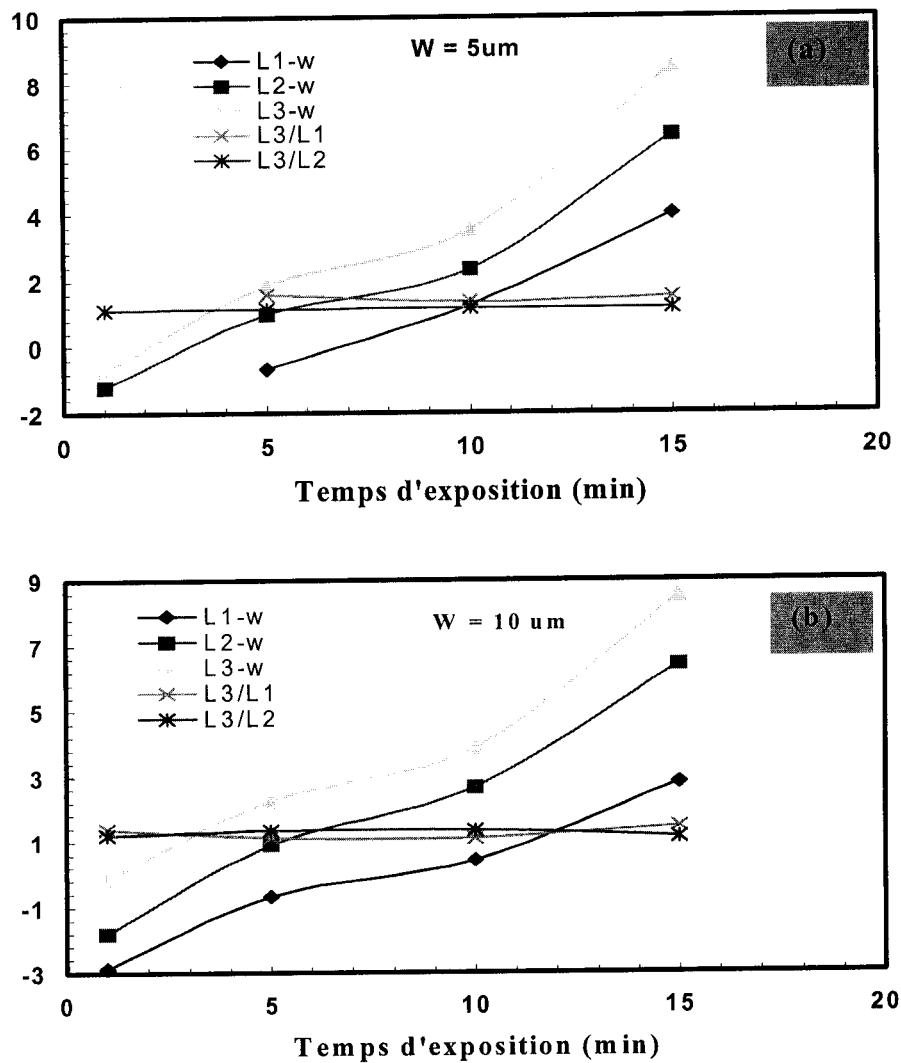
**Tableau IV-1 :** Les conditions d'expérience de la courbe de développement de ter-polymère.

Substrat = Si
Couche tampon = $\text{SiO}_2$ (épaisseur = 2.4 nm)
Solution = terpolymère
Vitesse de rotation de la tournette = 330 rpm
Pré-cuisson = 100 $^{\circ}\text{C}$ / 35 sec
Temps d'exposition à l'UV (sec) = 1,2,3,4,5,6,7,8,9,10, 12,14,16,18,20,25,30,40,50,60 et 70
Post-cuisson;
<b>Pour le procédé (a) = 130 <math>^{\circ}\text{C}</math> / 30 sec</b>
<b>Pour le procédé (b) = 130 <math>^{\circ}\text{C}</math> / 2 min</b>
Temps de la gravure humide = 40 sec/ solvant = acétone
Cuisson Final = 170 $^{\circ}\text{C}$ / 3 min

La qualité et la résolution des guides lors de l'exposition à la lumière UV dépendent du temps d'exposition et d'ouverture des guides sur le masque photolithographique. La **Figure IV-6**, montre l'effet de la durée d'exposition et de l'ouverture du masque sur la forme géométrique des guides. Les paramètres géométriques que nous avons mesuré à l'aide d'un microscope électronique à balayage (SEM) sont représentés dans la **Figure IV-5**. On remarque un élargissement important des guides pour des temps d'exposition supérieurs à 6 min. La courbe du rapport  $L_3 / L_2$  de la **Figure IV-6** témoigne du degré de verticalité des parois du guide et lorsque il est égal à 1, le guide est un rectangle quasiment parfait.



**Figure IV-5 :** Paramètres physiques, L1, L2, L3 et D, qui déterminent les dimensions et la forme géométrique du guide en relief.



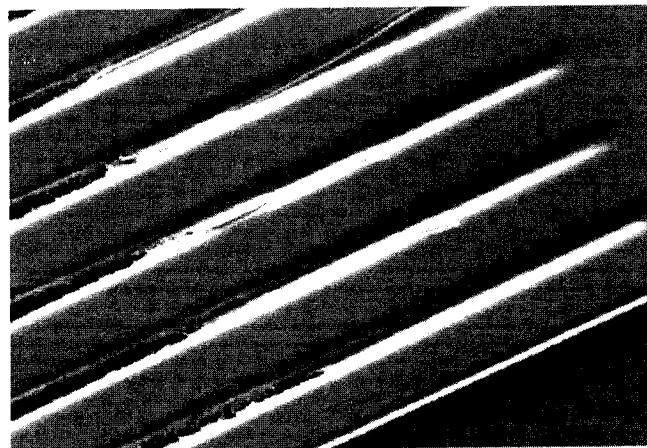
**Figure IV-6 :** Dépendance des dimensions et de la forme du guide en fonction du temps d'exposition à l'UV. a): ouverture du masque =  $5 \mu\text{m}$  et b): ouverture du masque =  $10 \mu\text{m}$ .

- Température et temps de la seconde cuisson

Nous désignons par seconde cuisson, la cuisson qui suit l'étape de l'exposition à l'UV. Elle constitue une étape nécessaire pour les polymères, elle permet de compléter le processus de polymérisation et de condensation comme expliqué dans le mécanisme réactionnel du processus de réticulation dans le chapitre I.

- Temps de gravure chimique humide

La gravure chimique devient critique lorsque les guides adjacents sont assez proches de telle manière que la distance qui les sépare est inférieure à  $5 \mu m$  et rend difficile de nettoyer et de dégager, par la gravure chimique humide la région entre deux guides adjacents. La photo qui apparaît dans la **Figure IV-7** montre la sortie d'un coupleur en étoile d'un DWDM portant les conséquences de difficulté de nettoyer en profondeur entre les guides très proches ( $< 5\mu m$ ). D'où l'importance du choix du solvant et le contrôle de l'opération de la gravure chimique humide. Dans la deuxième partie de ce chapitre, nous allons donner une méthode simple qui permet l'évaluation d'un solvant concernant l'étape de la gravure chimique humide.



**Figure IV-7 :** La sortie d'un coupleur en étoile d'un DWDM après la gravure chimique humide montrant la difficulté de nettoyer en profondeur entre les guides.

- Température et temps de cuisson d'après Gravure humide

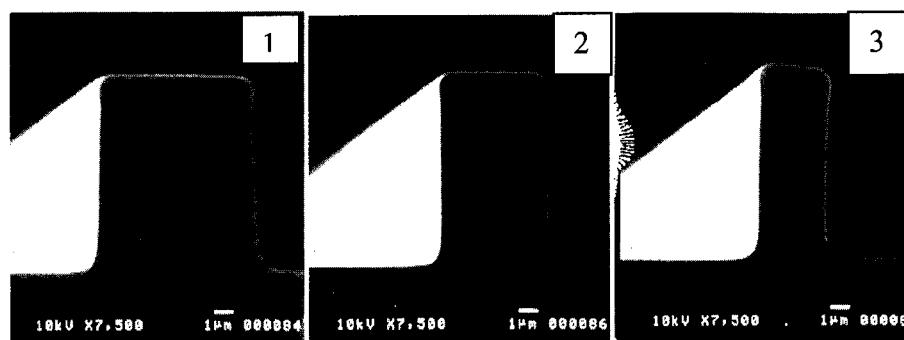
Après la gravure chimique humide, la procédure de la microfabrication des guides d'ondes se poursuit par une autre étape de cuisson. Souvent, dans cette étape, la température est supérieure à la température de la transition vitreuse  $T_g$  du matériel pour rendre la structure plus uniforme et évaporer les solvants résiduels.

- Température et temps de cuisson finale

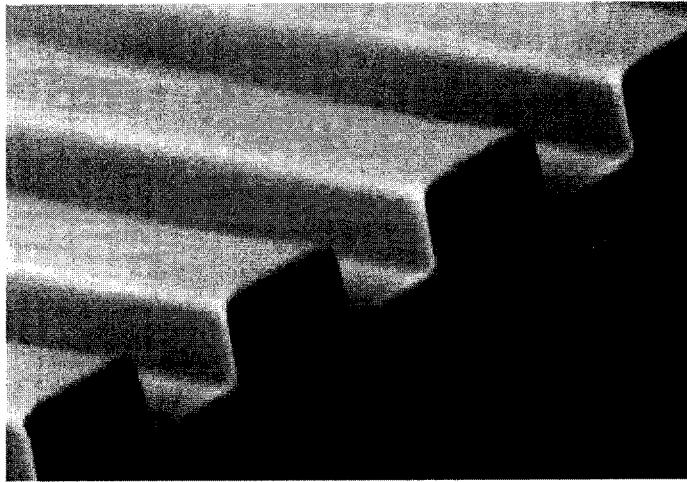
C'est une étape similaire à la précédente, mais elle dure plus longtemps que l'autre, sous une température (légèrement supérieure à la  $T_g$ ).

La température et la durée des différentes cuisson, le temps d'exposition à l'UV, le choix des solvants adéquats et le contrôle des conditions pour la gravure humide sont des paramètres cruciaux pour le contrôle et la reproductibilité de la lithographie (uniformité de la dimension du guide, qualité des parois, *bon aspect ratio*, etc...).

La résolution photo-lithographique dans une exposition par contact dépend aussi de l'espace entre le photomasque et le gouffre. De ce fait, certaines épaisseurs peuvent accentuer les effets d'interférence par diffraction provoquant ainsi un effet de distorsion sur les coins du guide comme le montre la **Figure IV-8**. La diffraction selon l'axe d'incidence normale pour un film épais est plus marquée que dans le cas d'un film mince. En plus, son effet est accentué quand les durées d'exposition aux UV sont longues, ce qui se traduit par des parois moins bien définies et plus rugueuses. Nous montrons dans la **Figure IV-8** une photographie SEM d'un guide fait à partir d'un sol-gel à aluminium (15 % d'aluminium) exposé durant trois minutes au UV.



**Figure IV-8 :** Photos SEM ( microscope électronique à balayage) des guides d'ondes en relief d'un sol-gel 15 % *Al* exposé durant trois minutes à travers une ouverture de masque de 10  $\mu\text{m}$ , 7  $\mu\text{m}$  et 5  $\mu\text{m}$  pour les photos 1, 2 et 3 respectivement.



**Figure IV-9 :** Photo SEM de la région de sortie du guide d'onde en étoile d'un DWDM.

Après l'optimisation du temps d'exposition et le choix du solvant ainsi que le temps de la gravure chimique humide, nous avons réussi à obtenir des guides d'ondes rectangulaires avec des parois verticales et lisses comme le montrent les **Figure IV-8** et **Figure IV-9**.

Nous avons fabriqué différents guides d'ondes en utilisant trois matériaux différents sol-gel composés de 20 % de zirconium au niveau molaire, 15 % d'aluminium et à base de polymère (*SFG*). Une bonne micro-fabrication, en terme de géométrie de guide, la qualité des surfaces et les parois du guide en relief ainsi que la résolution lithographique résultent de la bonne optimisation des différentes combinaisons des paramètres cités ci-dessus de la photolithographie comme le montrent les figures ci-dessus.

### **IV.3 Méthode simple pour évaluer un solvant pour l'étape de développement en microfabrication**

#### **IV.3.1 Contexte et objectifs**

Le choix du solvant s'avère important pour l'étape du développement d'un procédé photo-lithographique. Dans le cas d'un procédé photo-lithographique utilisant une photo-résine négative, le solvant doit dissoudre le matériau non-exposé à la source ultraviolette (UV), sans toutefois affecter les régions exposées. En fait, un mauvais choix du solvant

peut non seulement mener à une érosion (dissolution) du matériau exposé, mais peut aussi causer une déformation du matériau sous la forme d'une expansion, ou bien à contraction du matériau.

Dans cette section nous allons décrire une méthode pour déterminer quantitativement le degré de dissolution, d'expansion ou de contraction du matériau lorsqu'il est immergé dans un solvant. La méthode a été choisie principalement pour sa simplicité d'exécution. Ce n'est pas nécessairement la méthode qui donne les résultats les plus fiables dans des situations réelles. Par exemple, le solvant est immobile dans la méthode décrite alors qu'il est constamment en mouvement lorsqu'il est utilisé avec une tournette; le solvant peut devenir moins efficace dans le premier cas car il peut plus facilement se saturer de soluté. Quoiqu'il en soit, les résultats obtenus resteront utiles pour déterminer un solvant adéquat.

Le solvant actuellement utilisé en microfabrication est l'acétone. Ce produit donne des résultats acceptables pour le développement des structures, sans toutefois être exempte de problèmes. Son utilisation s'accompagne par la formation de gouttelettes d'eau sur la pastille lors du développement par tournette, et la difficulté de développer des structures ayant une faible distance entre elles (par exemple deux guides d'ondes parallèles séparés par un espacement inférieur à  $5 \mu\text{m}$ ).

Les gouttelettes viennent probablement de la nature du solvant et plus particulièrement de sa température d'ébullition trop faible ( $56^{\circ}\text{C}$ ) [Nov. A. 86]. Nous observons une baisse de température de la pastille pendant le développement avec la tournette due à l'évaporation du solvant. Cette baisse est d'autant plus importante que la température d'ébullition du solvant est faible. Les gouttelettes d'eau sont générées lorsque la température de la pastille atteint le point de rosée [Nov. A. 86]. La difficulté de développer des structures rapprochées peut être attribuée à une expansion importante des

structures lors du développement. Il est possible que cette expansion vienne empêcher le bon écoulement du solvant dans les régions entre les structures.

La méthode du choix d'un solvant pour la gravure chimique humide, consiste en l'utilisation d'un mélange d'un solvant et d'un non-solvant. Les proportions des composants du mélange peuvent ainsi être déterminées de manière à ne pas affecter les structures lors du développement. Pour le développement des structures à la base des co-polymères, nous avons choisi, entre autre, un développeur qui est un mélange de deux solvants, le 2,4-pentanedione et 1-butoxybutane (butyle éther). Le premier est un solvant fort pour le co-polymère alors que le deuxième est un non-solvant. La température d'ébullition est  $140^{\circ}\text{C}$  pour chacun des deux solvants, ce qui ne devrait pas refroidir la pastille de façon significative lors du développement.

#### **IV.3.2 Section expérimentale:**

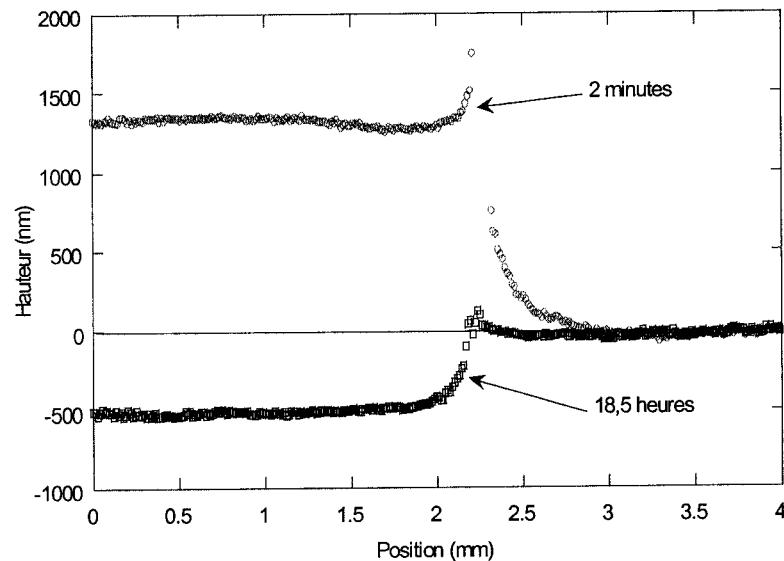
La méthode développée consiste à déposer une quantité relativement faible du solvant ( $10\ \mu\text{l}$ ) sur la couche mince du co-polymère. Ce co-polymère a été au préalable exposé à une source UV ( $22\ \text{mW/cm}^2$  pendant  $120\ \text{sec}$  et cuit sur une plaque à  $100^{\circ}\text{C}$  pendant  $120\ \text{sec}$ ). Après  $30$  secondes, la "goutte" de solvant est enlevée par un bref jet d'azote. L'échantillon est immédiatement examiné avec le profilomètre optique *Wyko* pour déterminer si le solvant a changé la forme de la couche mince.

#### **IV.3.3 Résultats et discussion:**

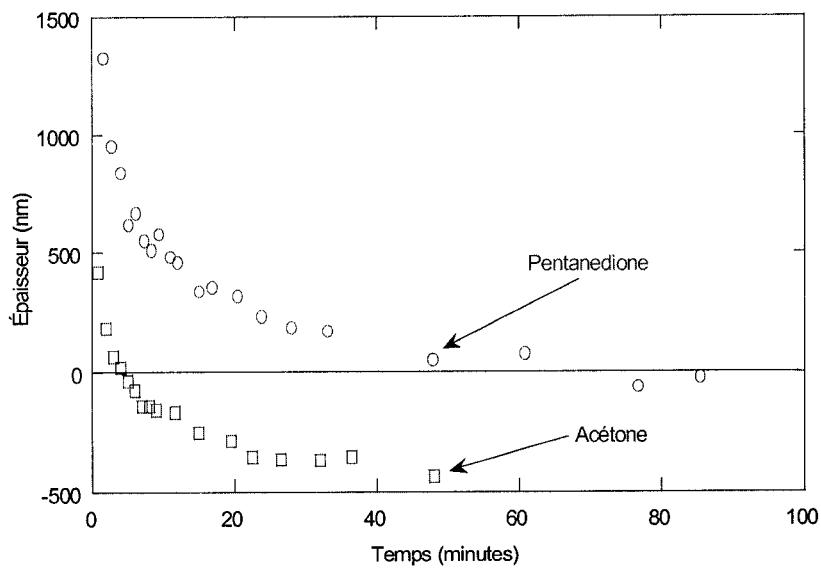
La **Figure IV-10** montre le profil de la couche mince du co-polymère dont une région (de  $0$  à  $2.3\ \text{mm}$ ) a été exposée au du pentanedione pendant  $30$  secondes. La région exposée a subi une expansion de volume d'environ  $1,3\ \mu\text{m}$ . Par contre, la même région après  $18,5$  heures montre que cette partie du matériau est moins volumineuse que celle qui n'a pas été exposée la couche environnante; la couche est en effet de  $0,58\ \mu\text{m}$  plus mince que la région non-exposée. Ceci démontre deux phénomènes: Tout d'abord, l'expansion causée par le solvant n'est pas permanente; elle décroît avec le temps probablement parce que le solvant résorbe du matériau. Cette variation en fonction du temps montre

l'importance de réaliser plusieurs mesures au profilomètre optique pour chaque échantillon. De cette façon, on peut déduire l'expansion du matériau lorsqu'il est encore en contact avec le solvant (c'est-à-dire, lorsque  $t = 0$ ). Deuxièmement, l'amincissemnt de la couche correspond probablement à une partie du matériau dissoute par le solvant et enlevée avec le jet d'azote.

La **Figure IV-11** montre la variation de l'épaisseur en fonction du temps de la couche mince du co-polymère exposée par un solvant. Bien que ce graphique ne le l'indique pas, la couche se stabilise à une épaisseur de  $-0,58 \mu m$  par rapport à la région non-exposée pour le cas du pentanedione et  $-0,80 \mu m$  pour celui de l'acétone. La **Figure IV-12** montre les mêmes résultats de la **Figure IV-11**, sauf que nous avons compensé la perte du matériau durant l'exposition au solvant. Ceci permet de déterminer l'expansion du matériau par le solvant. Ce graphique semi-logarithmique semble démontrer qu'il existe deux mécanismes de volatilisation (résorption) car celle-ci suit initialement une tendance exponentielle rapide pour continuer avec une autre exponentielle mais moins rapide. De plus, ce graphique permet de connaître l'expansion du matériau lorsqu'il est encore en contact avec le solvant (à  $t = 0$ ).



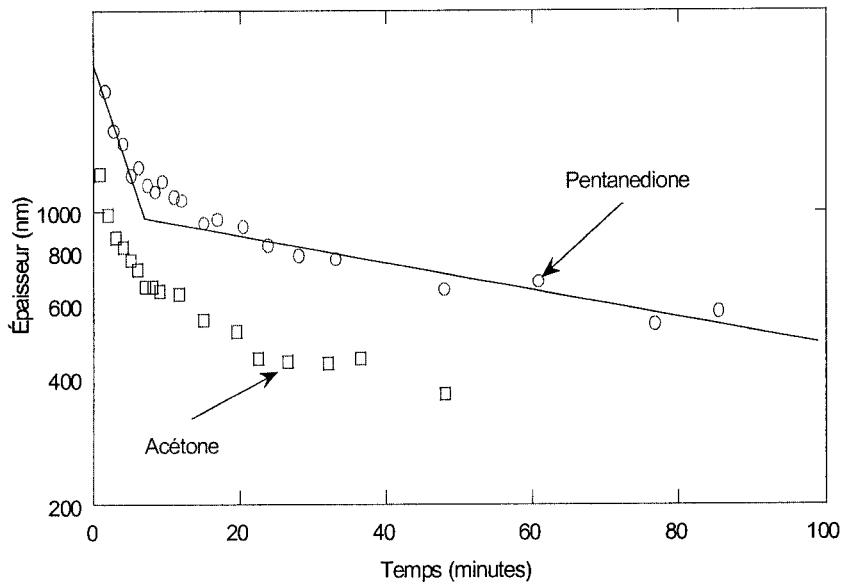
**Figure IV-10 :** Profil de la couche mince de co-polymère dont une région (de 0 à 2,3 mm) a été exposée au pentanedione.



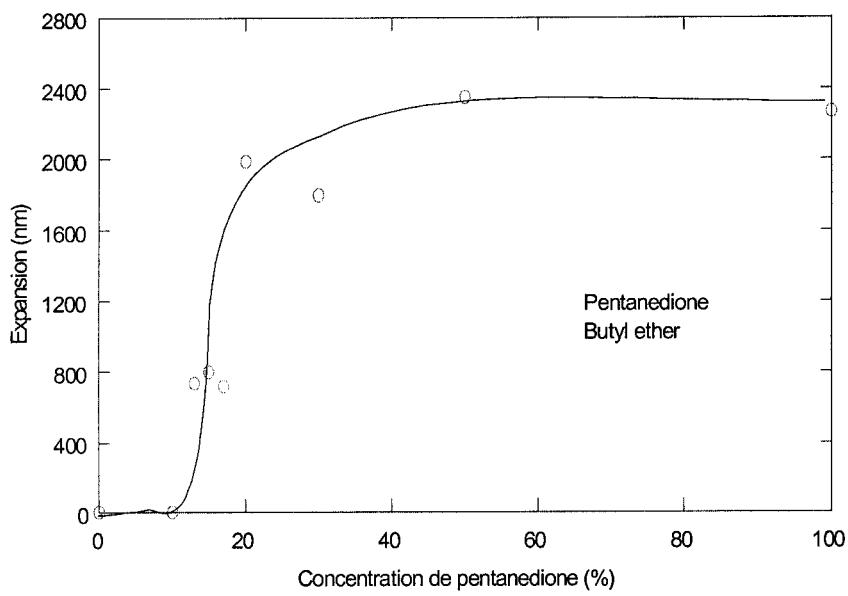
**Figure IV-11 :** Variation de l'épaisseur en fonction du temps de la couche mince de copolymère exposée au solvant.

En exprimant les résultats précédents en termes des valeurs que nous avons révélées pendant les expériences, nous disons que le matériau en contact avec le pentanedione a subit une expansion de  $2,3 \mu m$  alors que celui en contact avec l'acétone a subit une expansion de  $1,3 \mu m$ . Cette expansion correspond à 29 % de la valeur nominale de la couche mince ( $8 \mu m$ ) dans le cas du pentanedione et 16 % dans celui de l'acétone.

Nous avons réalisé une autre étude de l'expansion causée par un mélange de pentanedione et de butyle éther. La **Figure IV-13** montre l'expansion en fonction de la concentration de pentanedione dans le mélange à  $t = 0$ . nous avons remarqué que le pentanedione pur (100 %) cause une expansion de  $2,3 \mu m$  alors qu'aucune expansion avec le butyle éther pur (0 %). Il existe une transition rapide dans le comportement du mélange sur le matériau lorsque la concentration de pentanedione devient supérieure à 14 %. La courbe dans la **Figure IV-13** est simplement une aide visuelle, elle ne correspond pas nécessairement à une fonction mathématique. De plus, nous avons remarqué une érosion du matériau lorsque la concentration du pentanedione était de 50 % et 100 %.



**Figure IV-12 :** Variation de l'épaisseur en fonction du temps de la couche mince de co-polymère exposée par un solvant.



**Figure IV-13 :** Expansion de la couche mince du co-polymère (à  $t = 0$ ) en fonction de la concentration de pentanedione. La courbe dans la figure est tout simplement une aide visuelle.

#### **IV.3.4 Conclusion**

Les résultats de notre étude établissent certains critères pour choisir un solvant ou co-solvant adéquatement. Nous suggérons tout d'abord d'utiliser un mélange de pentanedione de butyle et d'éther dans la proportion (10/90) dans l'étape de développement car cette proportion réduirait l'expansion du matériau polymérisé.

À la lumière de ce que nous avons fait, nous pensons qu'une étude sera nécessaire pour déterminer la vitesse de gravure dans les régions non-polymérisées (non-exposées aux rayons UV) et dans la couche tampon. De plus, une autre étude sera nécessaire pour déterminer si les structures sont bien développées ainsi que pour connaître la résolution maximale réalisable avec ce mélange de solvants. Finalement, il serait peut-être nécessaire d'évaluer l'efficacité d'un rinçage avec un autre mélange pentanedione/butyle éther et/ou un non-solvant plus volatile (comme l'éther) [Nov. A. 86][Pit. C. 99].

### **IV.4 Effets du choix de la couche tampon et de la couche de gaine sur les performances optiques de composant *DWDM 16x16***

#### **IV.4.1 Introduction**

Dans cette section, nous présentons les améliorations que nous avons apportées aux performances optiques des composants *DWDM*. Plusieurs caractéristiques de la réponse optique comme la perte d'insertion (*IL*), la perte due à la polarisation (*PDL*) et la diaphonie (*XT*) ont été améliorées en optimisant les différentes combinaisons de matériaux de la couche tampon et de la couche de la gaine. Les combinaisons que nous avons traitées sont: *BG-FG*, *BG-BG*, *FG-FG* et *FG-BG*.

La couche tampon *BG* et la gaine *FG* appartiennent à la famille des co-polymère (décrise dans le chapitre I) qui peuvent avoir un coefficient thermique différent de celui de guide, qui est un ter-polymère *SFG* (voir chapitre I). Les propriétés thermiques du copolymère *FG* sont comparables à ceux du guide: parce que la synthèse du ter-polymère pour la

couche du guide se fait simplement par l'ajout d'un troisième composant chimique *SD* (voir chapitre I). Ce qui nous a conduit à penser remplacer la structure courante, dont la couche tampon et la couche gaine sont de type (*BG*), par une autre structure dont la couche tampon est de type (*BG*) alors que la couche gaine est de type (*FG*), ou encore, par la structure dont la couche tampon et la couche gaine sont de même de type (*FG*). Ceci a pour fin de réduire le stress exercé par la couche tampon et la couche gaine sur le guide.

La conséquence immédiate de la réduction du stress est la diminution de la *PDL* qui se traduit par l'amélioration de perte d'insertion et de la diaphonie (*XT*).

#### IV.4.2 Expérience

L'expérience a été répétée trois fois, en utilisant trois lots différents de matériaux dans le but d'avoir des résultats statistiques et concluants.

Dans chacune des trois expériences, nous avons fabriqué des composants DWDM (*1x8 200GHz*) sur une couche-tampon *BG*, puis nous avons couvert 50 % d'échantillons par une gaine de type *BG* et l'autre 50 % par une gaine de type *FG*, tout en gardant le même procédé de microfabrication. Nous avons ensuite procédé à la caractérisation et au test des *DWDM* obtenus.

#### IV.4.3 Résultats

##### Expérience-1.

Les composants *DWDM* (*1x8 200GHz*) montrent des performances meilleures en terme de perte d'insertion, de largeur de bande, de décalage (shift) *TE/TM* et de diaphonie (*XT*), lorsque la gaine *BG* est remplacée par la gaine *FG*. Les résultats de cette première expérience sont représentés dans le **Tableau IV-2**.

Par contre, toujours d'après les résultats du **Tableau IV-2**, lorsque la couche tampon est de type *FG* ou *BG*, les performances optiques de composant *DWDM* sont comparables.

### Expérience-2. (même procédure que dans l'expérience 1)

Les résultats concernant le deuxième lot de *DWDM* (1x8 200GHz) sont présentés dans le **Tableau IV-3** et montrent une nette amélioration du décalage (shift) entre les deux polarisations *TE* et *TM*, mais l'amélioration des autres performances optiques n'est pas aussi significative que dans la première expérience. Le **Tableau IV-3** montre aussi une amélioration de la réponse optique des *DWDM* en terme de diaphonie adjacente (*AXT*), de perte d'insertion (*IL*) et de perte dépendant de la polarisation (*PDL*) lors d'un gainage avec *FG* comparativement au gainage avec *BG*.

### Expérience-3

Dans le but de mesurer la *PDL* avec précision dans cette expérience, nous avons fabriqué des *DWDM 1X8 100 GHz* plus sensibles à la polarisation que les composants *DWDM 1X8 200 GHz*.

Les composants *DWDM 1X8 100 GHz* ayant *FG* comme gaine montrent, comme dans l'expérience 1, de bonnes performances optiques comme confirmées par les résultats du **Tableau IV-4**.

**Tableau IV-2 :** Résultats en terme de réponse optique des différents *DWDM* de la première expérience.

Échantillon I.D.	Type de la couche tampon	Type de la couche gaine	<i>moy.d'IL (dB)</i>	<i>BW@20dB</i>	<i>TE-TM shift (nm)</i>	<i>AXT (dB)</i>
LR01-0076-0302	<i>BG(6:5)</i>	<i>BG(6:5)</i>	<b>7.06</b>	<b>2.75</b>	<b>0.33</b>	<b>15.3</b>
LR01-0077-0101	<i>BG(6:5)</i>	<i>FG(6:4)</i>	<b>6.41</b>	<b>2.40</b>	<b>&lt;0.1</b>	<b>23.2</b>
LR01-0077-0202	<i>BG(6:5)</i>	<i>FG(6:4)</i>	<b>6.43</b>	<b>2.51</b>	<b>0.06</b>	<b>19.3</b>
LR01-0077-0301	<i>BG(6:5)</i>	<i>FG(6:4)</i>	<b>6.66</b>	<b>2.47</b>	<b>&lt;0.1</b>	<b>20.2</b>
LR01-0078-0202	<i>FG(6:4)</i>	<i>BG(6:5)</i>	<b>7.56</b>	<b>2.78</b>	<b>0.36</b>	<b>14.6</b>
LR01-0079-0202	<i>FG(6:4)</i>	<i>FG(6:4)</i>	<b>6.53</b>	<b>2.54</b>	<b>0.06</b>	<b>18.2</b>
LR01-0079-0302	<i>FG(6:4)</i>	<i>FG(6:4)</i>	<b>6.71</b>	<b>2.43</b>	<b>0.07</b>	<b>21.3</b>
<b>Avantages de la couche gaine de type (FG) sur celle de type (BG)</b>			<b>6.55 - 7.31</b> <b>-0.76 dB</b>	<b>2.47 - 2.77</b> <b>-0.30 nm</b> <b>(-10.8%)</b>	<b>0.08 - 0.35</b> <b>-0.27 nm</b>	<b>20.4 - 15</b> <b>+5.4 dB</b>

**Tableau IV-3.:** Résultats de l'expérience 2 en terme de réponse optique des différents DWDM (200 GHz).

Échantillon I.D.	Type de la couche tampon	Type de la couche gaine	moy.d'IL (dB)	BW@20dB	TE-TM shift (nm)	AXT (dB)
LR01-90A-201	BG(6:5)	BG(6:5)	7.05	2.68	0.23	17.2
LR01-90A-301	BG(6:5)	BG(6:5)	7.19	2.61	0.29	17.3
LR01-90A-302	BG(6:5)	BG(6:5)	7.05	2.66	0.24	16.7
LR01-91A-202	BG(6:5)	BG(5:5)	7.57	2.71	0.23	15.7
LR0191A0203	BG(6:5)	BG(5:5)	7.73	2.76	(<0.05)	14.8
LR01-91A-302	BG(6:5)	BG(5:5)	7.35	2.66	0.27	17.6
LR01-92A-202	BG(6:5)	<b>FG(6:4)</b>	<b>7.26</b>	<b>2.58</b>	< 0.15	<b>17.8</b>
LR01-92A-302	BG(6:5)	<b>FG(6:4)</b>	<b>7.19</b>	<b>2.64</b>	< 0.15	<b>16.7</b>
LR01-92B-0302	BG(6:5)	<b>FG(6:4)</b>	< 7.0	2.70	< 0.15	<b>16.1</b>
<b>Avantages de la couche gaine de type (FG) sur celle de type (BG)</b>			7.15 - 7.32 <b>-0.17 dB</b>	2.64 - 2.68 <b>-0.04 nm (-1.5%)</b>	0.15 - 0.25 <b>-0.10 nm</b>	16.9 - 16.6 <b>+0.3 dB</b>

**Tableau IV-4 :** Résultats en terme de réponses optiques des différents DWDM (100 GHz) de l'expérience 3.

Échantillon I.D.	Type de la couche tampon	Type de la couche gaine	moy.d'IL (dB)	BW@20dB	TE-TM shift (nm)	AXT (dB)
LR01-012a-1	BG(5:5)	BG(4:5)	7.61	1.52	0.23	10.6
LR01-012a-2	BG(5:5)	BG(4:5)	7.31	1.54	0.21	10.1
LR01-013b-1	BG(5:5)	BG(4:5)	8.22	1.44	0.22	12.4
LR01-013b-2	BG(5:5)	BG(4:5)	7.54	1.46	0.22	12.1
LR01-012b-1	BG(5:5)	FG(6:4)	7.24	1.34	0.13	15.9
LR01-012b-2	BG(5:5)	FG(6:4)	7.03	1.33	0.12	16.6
LR01-019a-1	BG(5:5)	FG(6:4)	7.13	1.40	0.16	14.3
LR01-019a-2	BG(5:5)	FG(6:4)	6.79	1.39	0.09	14.3
<b>Avantages de la couche gaine de type (FG) sur celle de type (BG)</b>			7.05 - 7.67 <b>-0.62 dB</b>	1.36 - 1.49 <b>-0.13 nm (-8.7%)</b>	0.12- 0.22 <b>-0.1 nm</b>	15.3- 11.3 <b>+4.0 dB</b>

#### IV.4.4 Conclusion

Les résultats des performances optiques des composants *DWDM (200 GHz)* et *DWDM (100 GHz)* des trois expériences réalisées séparément et avec trois différents lots de matériaux, confirment l'avantage de la gaine *FG* sur la gaine *BG*. En utilisant *FG* comme gaine, nous avons réduit la perte d'insertion (*IL*) de *0.76* et *0.62* dans les composants *DWDM 1X8 100 GHz* et *200 GHz* respectivement. Nous avons aussi réduit le décalage (shift) *TE/TM* de *0.3* à *0.1 nm* et la largeur de bande de la réponse optique à la sortie du canal de *8* à *10 %*. Celle-ci a été mesurée à *20 dB* depuis le sommet de pic vers le bas. De plus, la diaphonie adjacente (*AXT*) a été améliorée de *4* à *5.4 dB*, comparativement au même composants *DWDM* mais avec une gaine *BG*.

## CHAPITRE V. ÉTUDE DES PROPRIÉTÉS THERMO-OPTIQUES DES MATÉRIAUX SOL-GEL ORGANIQUE-INORGANIQUE ET POLYMÈRES

### V.1 Matériaux sol-gel

#### V.1.1 Résumé

Les performances et le fonctionnement des éléments optiques à base de sol-gel dépendent largement des propriétés thermo-optiques de ce dernier.

Dans ce chapitre, nous exposerons les propriétés thermo-optiques du sol-gel organique inorganique au Zirconium et Aluminium. La procédure que nous avons suivie consiste à mesurer la variation de l'indice de réfraction en fonction de la température dans des guides d'ondes plans.

La mesure de l'indice de réfraction en fonction de la température permettra de déduire les paramètres suivants: la constante thermo-optique  $dn/dT$  et le coefficient d'expansion thermique  $\alpha$ . Ces deux paramètres sont indispensables pour la caractérisation thermo-optique du matériau.

À l'aide d'un prisme coupleur intégré à un contrôleur de température Peltier et à des sources laser HeNe  $632.8\text{ nm}$ ,  $1300\text{ nm}$  et  $1500\text{ nm}$ , nous avons mesuré la variation de l'indice de réfraction des guides plans en fonction de la température sur un intervalle de température allant de  $10^{\circ}\text{C}$  à  $80^{\circ}\text{C}$  avec un pas de  $5^{\circ}\text{C}$  pour les deux polarisations  $TE$  et  $TM$ . Cette variation suit la loi de Lorentz-Lorenz. Nous avons ensuite déduit la constante thermo-optique en mesurant la pente  $dn/dT$ , elle a été mesurée avec un coefficient de corrélation  $r \geq 0.997$ .

Les résultats montrent qu'un état de biréfringence zéro pourrait être obtenu et le coefficient thermo-optique pour différents guides d'ondes plans est approximativement constant et il est de l'ordre de  $10^{-4} / {}^{\circ}C$ .

Nous avons aussi testé l'effet combiné du traitement à l'UV et de la cuisson sur l'indice de réfraction ainsi que la variation de la biréfringence en fonction de la température et le temps d'exposition à l'UV.

### V.1.2 Introduction

L'indice de réfraction  $n(\lambda, T)$  est un paramètre important dans la caractérisation d'un matériau. Vu sa valeur spécifique pour un matériau pur, il est utilisé pour l'identification des substances, l'analyse des mixtures binaires, l'estimation du poids moléculaire, etc... L'évaluation de la variation de l'indice de réfraction en fonction de la température est essentielle dans certaines applications.

L'effet thermo-optique (*TO*), qui est dû au fait que l'indice de réfraction dépend de la température, est essentiel pour la construction des circuits optiques intégrés. Il est indispensable de le caractériser pour la réalisation des composants optiques passifs avec des fonctions de commutation (*switching*) et d'adaptation ou d'ajustement [Nis. H. 89] [Kaw. M. 90]. L'effet thermo-optique se manifeste dans tous les matériaux transparents, y compris les diélectriques, les semi-conducteurs et les films organiques. De nombreuses études ont montré la variation du volume spécifique en fonction de la température pour les polymères. Pour les polymères, le coefficient d'expansion thermique volumique est beaucoup plus grand que celui des matériaux inorganiques. La variation de l'indice en fonction de la température pour les polymères est due essentiellement à cette expansion thermique [Car. J. 86].

La famille des verres hybrides se situe entre celle des polymères organiques et celle des verres à réseau inorganique. Il est donc important d'explorer les propriétés thermo-optiques de cette classe de matériaux. De telles expériences devront permettre la caractérisation des températures de transition dans le sol-gel organique-inorganique et

leurs variations en fonction du procédé de la synthèse du sol et le processus de la micro-fabrication.

Les procédés des verres sol-gel organiques-inorganiques pour les guides d'ondes planaires sont très divers. En plus, le génie moléculaire offre l'opportunité de développer des sol-gels avec des propriétés optimisées pour des applications bien spécifiques.

Historiquement, l'industrie du verre appliquée à l'optique a été dominée par des procédés à haute température. Dans le cas du sol-gel hybride, la combinaison des propriétés des matériaux purement organiques et inorganiques, devient très prometteuse en terme de résolution en température, de transparence et de compatibilité. Par conséquent, le processus de micro-fabrication par le procédé sol-gel dans le domaine de l'optique intégrée est très rentable [Far. M. 97][Naj. S. 96]. Ce processus facilite la connexion avec les fibres optiques et aussi l'empaquetage, ce qui favorise la production en quantité industrielle.

Pour optimiser l'utilisation du sol-gel hybride dans le domaine de l'optique intégrée, le design des dispositifs optiques exige la connaissance et la détermination de certains paramètres du matériau tels que, l'indice de réfraction, le coefficient thermo-optique  $dn/dT$  et le coefficient d'expansion thermique linéaire  $\alpha$ .

Dans cette section nous nous intéressons aux propriétés thermo-optique du verre hybride sol-gel à basse température. Dans les références [And. M. 97][Nov. B. 93], la méthode sol-gel appliquée à l'optique intégrée a été exposée. Ce verre hybride organiquement modifié appartient à la famille des verres organiques-inorganiques connue en tant que "hybrid-sol-gel-glass (HSGG)". Une étude systématique a été consacrée à l'évaluation de la variation de l'indice de réfraction avec la température pour ces matériaux. De la relation de Lorentz-Lorenz [Born. M. 59] suivante:

$$\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} = \frac{4\pi}{3} NP, \quad \text{Eq. V-1}$$

où  $N$  exprime la densité de la lumière réfléchie (*number density of light scatterers*) et  $P$  est la polarisabilité d'une diffusion individuelle. La variation de l'indice de réfraction est essentiellement due au changement de la densité du matériau.

Nous avons étudié d'une façon systématique la variation de l'indice de réfraction en fonction de la température pour trois échantillons fabriqués sous différents traitements. Les mesures ont été prises dans un intervalle s'étendant de 10 °C à 80 °C, aucune transition de phase n'a été observée pour les trois échantillons. Pour chaque échantillon, nous avons tracé la fonction inverse de la relation de Lorentz-Lorenz:

$$f_{LL} = \frac{n_2 + 2}{n_2 - 1}, \quad \text{Eq. V-2}$$

En fonction de la température, d'après son expression  $f_{LL}$  est proportionnelle au volume spécifique. De plus, elle est une fonction linéaire en fonction de la température et sa pente représente le coefficient d'expansion thermique  $\alpha$ . Ce coefficient peut facilement être déduit de la mesure de l'indice de réfraction en fonction de la température.

### V.1.3 Synthèse et fabrication

Les matériaux sol-gel ont été préparés selon le procédé décrit dans la référence [Ira. S. 98]. Les solutions ont été laissées à la température ambiante pendant 15 heures avant la déposition des films par la méthode de la tournette. Puisque les verres à base de la silice organiquement modifiés tolèrent plus le stress que les verres dérivés de la silice traditionnelle, la fabrication des guides d'ondes plans se fait en une seule étape. L'épaisseur de la couche guidante, entre 2 et 10  $\mu m$ , est bien contrôlée par la vitesse de la tournette et la viscosité de la solution. Après le dépôt des films, ils sont immédiatement

pré-cuits à  $60^{\circ}\text{C}$  et  $85^{\circ}\text{C}$  pendant 15 à 60 min. Cette étape de pré-recuissage est indispensable pour solidifier le film et éviter qu'il colle au masque photo-lithographique. Après l'étape de la pré-recuissage, les échantillons sont exposés à la lumière UV ( $350\text{ nm}$ ,  $22\text{ mw/cm}^2$ ) et ( $256\text{ nm}$ ,  $12.66\text{ mw/cm}^2$ ). Cette étape d'exposition déclenche la polymérisation des radicaux et favorise des condensations supplémentaires et aussi la densification des matrices du gel, ce qui se traduit par une augmentation de l'indice de réfraction [Sar. K. 98].

#### V.1.4 Résultats et caractérisation

Les films sont déposés sur des substrats de silicium avec une couche  $\text{SiO}_2$  de  $2.4\text{ }\mu\text{m}$ . Les films sol-gel forment ainsi des guides plans puisque leurs indices sont supérieurs à celui de  $\text{SiO}_2$ .

Nous avons réalisé la caractérisation en terme d'indice de réfraction et d'épaisseur des différentes couches sol-gel en fonction de la température par la méthode de couplage par prisme [Naj. S. 92] pour la longueur d'onde  $632.8\text{ nm}$ . L'épaisseur des films utilisés pour cette expérience est entre  $5$  et  $7\text{ }\mu\text{m}$ . La température de l'échantillon est contrôlée par un système Peltier. Les mesures de l'indices pour les deux polarisations  $TE$  et  $TM$  ( $n_{TE}$  et  $n_{TM}$ ) et d'épaisseurs en fonction de la température ont été réalisées à l'aide d'un montage intégrant le système de prisme coupleur et le contrôleur de température Peltier.

##### V.1.4.1 L'effet de l'exposition à l'UV.

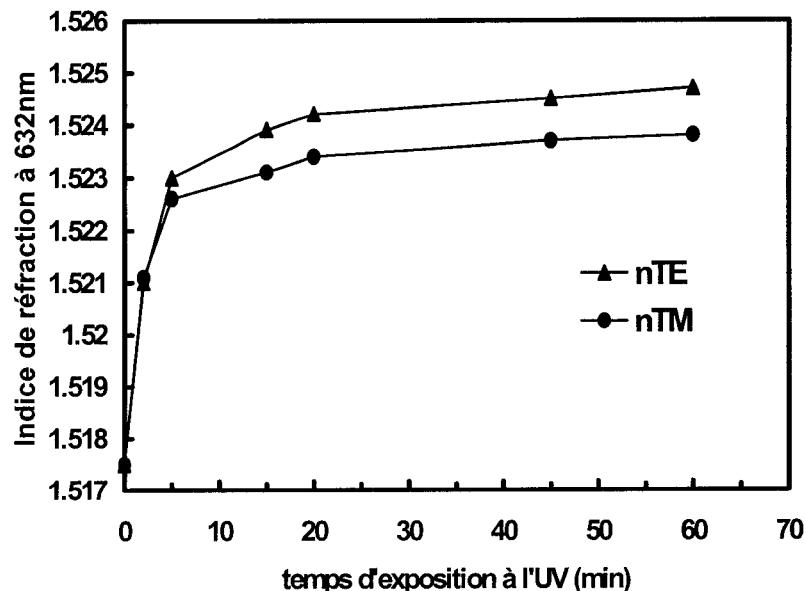
La **Figure V-1** montre, pour les films du sol-gel à 22 % de  $\text{ZrO}_2$ , la variation de l'indice de réfraction ( $n_{TE}$  et  $n_{TM}$ ) en fonction du temps d'exposition à l'UV. Les films ont pour épaisseur  $7\text{ }\mu\text{m}$ , ont été pré-recuit à  $60^{\circ}\text{C}$  pendant 30 min suivie de  $85^{\circ}\text{C}$  pendant 30 min puis exposés à l'UV ( $350\text{ nm}$ ,  $22\text{ mw/cm}^2$ ) pendant  $2\text{ min }45\text{ sec}$ . Les guides plans ainsi obtenus sont exposés à l'UV ( $256\text{ nm}$ ,  $12.66\text{ mw/cm}^2$ ) à différents temps d'exposition variant entre 0 et 60 min.

Après 20 min d'exposition, l'indice de réfraction atteint la valeur de 1.5175, ce qui correspond à une augmentation d'indice de 0.0067 et 0.0059 pour les modes  $TE$  et  $TM$

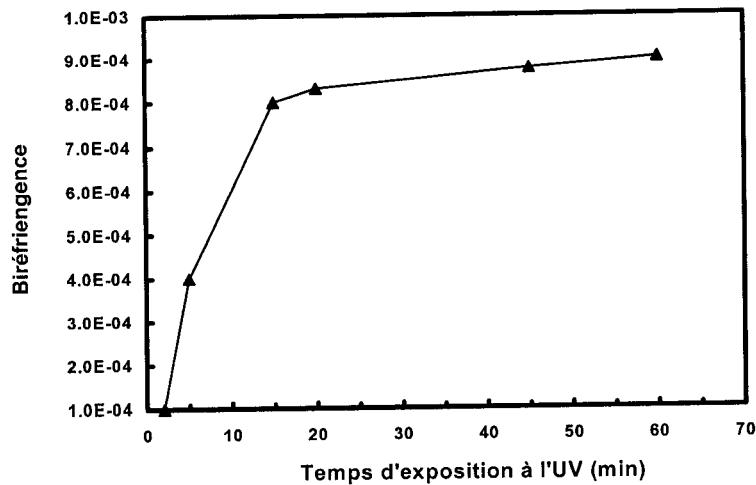
respectivement. La valeur du plateau est 1.5247 (resp. 1.5238) pour le mode *TE* (resp. mode *TM*).

La **Figure V-2** montre la variation de la biréfringence en fonction du temps d'exposition à l'UV. La biréfringence augmente avec le temps d'exposition, le plateau est atteint après 20 min d'exposition. La combinaison des effets de la température de la post-cuisson et l'exposition à l'UV peut conduire à l'obtention d'un guide d'ondes ayant la même constante de propagation pour le mode *TE* et *TM* [Tou. T. 97]. La polymérisation étant plus rapide dans les 10 premières minutes de l'exposition à l'UV, ce qui se traduit aussi par une grande variation de l'indice de réfraction, pendant cette période de conversion, qui semble impliquer les groupes acrylates qui sont suffisamment proches les un des autres [Sar. K. 98].

La condensation conduit à la formation d'un matériau fragile avant que la polymérisation n'ait lieu, la polymérisation peut alors induire un stress interne. Ce stress est manifesté par l'écart important entre les indices de réfraction des deux polarisations *TE* et *TM*, après 10 min d'exposition à l'UV, comme le montrent les **Figure V-1** et **Figure V-2**.



**Figure V-1** : Variation de l'indice de réfraction ( $n_{TE}$ ,  $n_{TM}$ ) des films à base de  $ZrO_2$  (22%) en fonction du temps d'exposition à l'UV.



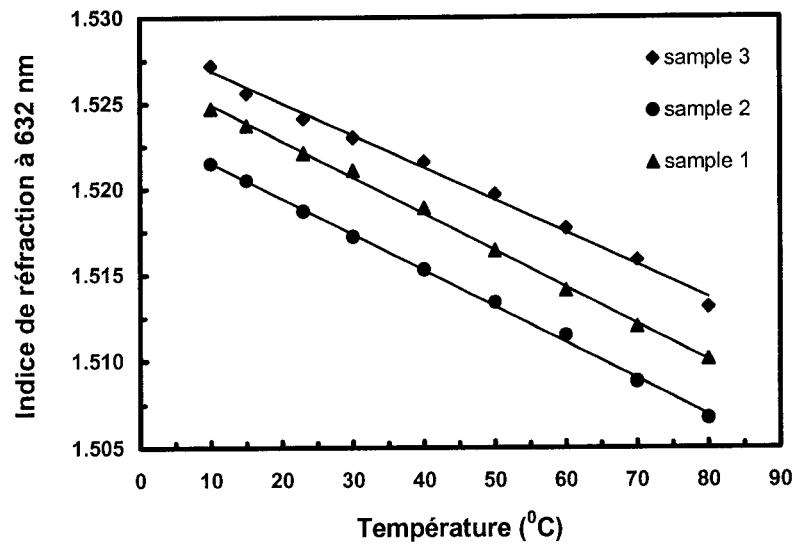
**Figure V-2 :** La variation de la biréfringence en fonction du temps d'exposition.

#### V.1.4.2 Effet de la température de cuisson sur l'indice de réfraction et sur la dépendance en polarisation des guides d'onde sol-gel

- L'effet combiné de la température de l'après cuisson et du temps d'exposition:

Nous avons étudié l'effet de la température et du temps de la post-cuisson sur les films sol-gel. Nous avons expérimenté trois échantillons de même épaisseur pré-cuit à 60 °C pendant différent temps de cuisson et exposés à l'UV pendant différents temps. Les résultats de l'expérience exposés dans le **Tableau V-1** révèle que la variation d'indice est plus sensible à l'UV qu'à la température.

Pour un même temps de cuisson, l'indice de réfraction augmente avec le temps d'exposition, comme le montre la **Figure V-1**. Mais, d'après les résultats des échantillons 1 et 3 du **Tableau V-1**, pour un même temps d'exposition et quand la température de pré-cuisson augmente l'indice de réfraction décroît.



**Figure V-3 :** Variation de l'indice de réfraction en fonction de la température pour les échantillons 1, 2 et 3.

**Tableau V-1 :** Les paramètres de fabrication des films (guides d'onde plans ).

échantillons	Température de Pré-cuisson (°C)	Temps de pré-cuisson (min)	Temps d'exposition (sec)	L'indice $n_{TE}$ à 24 (°C)
1	60	90	180	1.5221
2	60	30	90	1.5187
3	60	30	180	1.5241

**Tableau V-2 :** Coefficient thermo-optique  $(dn/dT)_{TE}$  ,  $(dn/dT)_{TM}$ , la température dont la biréfringence est zéro et le coefficient d'expansion thermo-optique  $\alpha_{TE}$  .

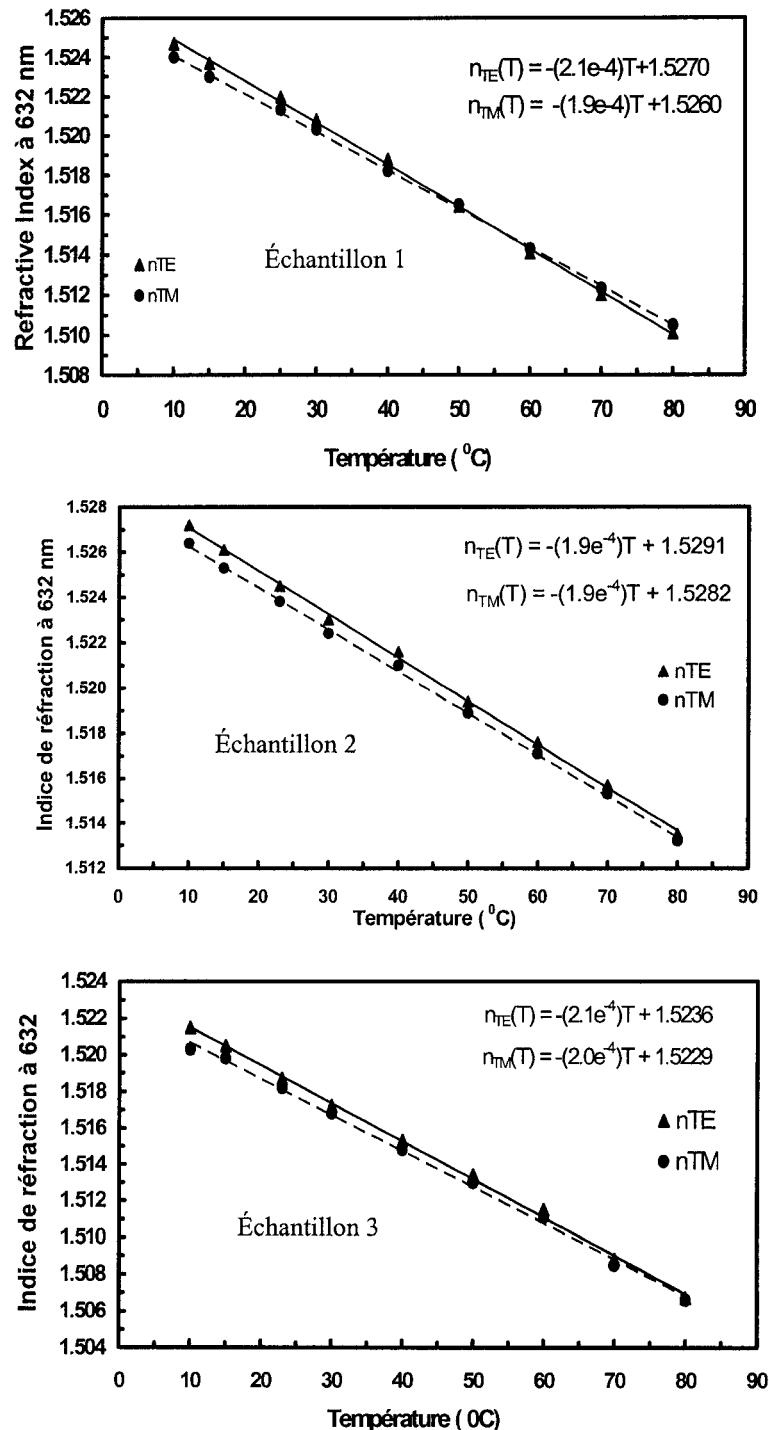
échantillons	$(dn/dT)_{TE}$ (°C <sup>-1</sup> )	$(dn/dT)_{TM}$ (°C <sup>-1</sup> )	La température $T$ (°C) où la biréfringence zéro est obtenue.	$\alpha_{TE}$ (°C <sup>-1</sup> )
1	$-2.1 \times 10^{-4.1}$	$-1.9 \times 10^{-4.1}$	53	$3.51 \times 10^{-4.1}$
2	$-2.1 \times 10^{-4.1}$	$-2.0 \times 10^{-4.0}$	80	$3.49 \times 10^{-4.1}$
3	$-1.9 \times 10^{-4.1}$	$-1.9 \times 10^{-4}$	>80	$3.02 \times 10^{-4.1}$

Une pré-cuisson longue durcit la structure. Par conséquent, le taux de polymérisation décroît. L'écart d'indice de réfraction  $\Delta n$  entre les trois échantillons du **Tableau V-1** est quasiment maintenu constant pour les différentes températures comme le montre la **Figure V-3**. Donc, en ajustant l'indice de réfraction pour les trois échantillons et en négligeant le stress exercé par la couche tampon, la gaine et le substrat, nous pouvons fabriquer des guides d'ondes avec un  $\Delta n$  indépendant de la température.

La **Figure V-4** montre la variation de l'indice de réfraction en fonction de la température pour les trois échantillons. Les résultats des mesures sont linéaires et le coefficient de corrélation est  $r \geq 0.997$ . L'indice de réfraction décroît au fur et à mesure que la température croît. Le coefficient thermo-optique et la température où la biréfringence est nulle, sont exposés dans le **Tableau V-2**. La variation d'indice en fonction de la température pour les deux polarisations *TE* et *TM* donne la dépendance de la biréfringence à la température et présentée dans la **Figure V-5**.

La pente  $dn/dT$  pour les polarisations *TE* et *TM* modes est égal à  $-2 \times 10^{-4} / {}^\circ C$ . Cet effet thermo-optique intrinsèque est stable, aucun changement ou déformation du matériau lors de l'augmentation de la température n'ont été notés. Lorsque la température augmente, la différence  $n_{TE} - n_{TM}$  diminue, ce qui conduit à la biréfringence zéro. La valeur de la température conduisant à la biréfringence zéro, dépend du traitement subit par l'échantillon (voir le **Tableau V-2**). Pour l'échantillon 1, la température de pré-cuisson était de  $90 {}^\circ C$ , la biréfringence est éliminée à faible température comparativement à l'échantillon 2 dont la température de la pré-cuisson est  $30 {}^\circ C$ . Alors que la biréfringence pour l'échantillon 3 devrait être éliminée à température plus élevée.

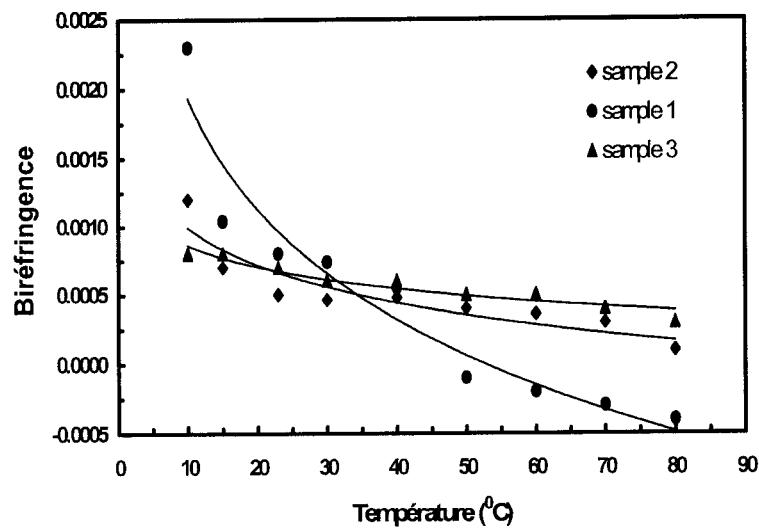
Les contraintes rencontrées dans les procédés de micro-fabrication, nous imposent souvent le choix du matériau. Dans cette expérience nous avons choisi le sol 22 % ZrO<sub>2</sub>, tandis que le procédé est optimisé pour une meilleure résolution en terme de micro-fabrication des guides d'onde en reliefs. Le procédé de microfabrication pour la pré-cuisson que nous avons utilisé est le suivant: une cuisson à  $60 {}^\circ C$  pendant 30 min suivit d'une cuisson de  $85 {}^\circ C$  pendant et 20 min.



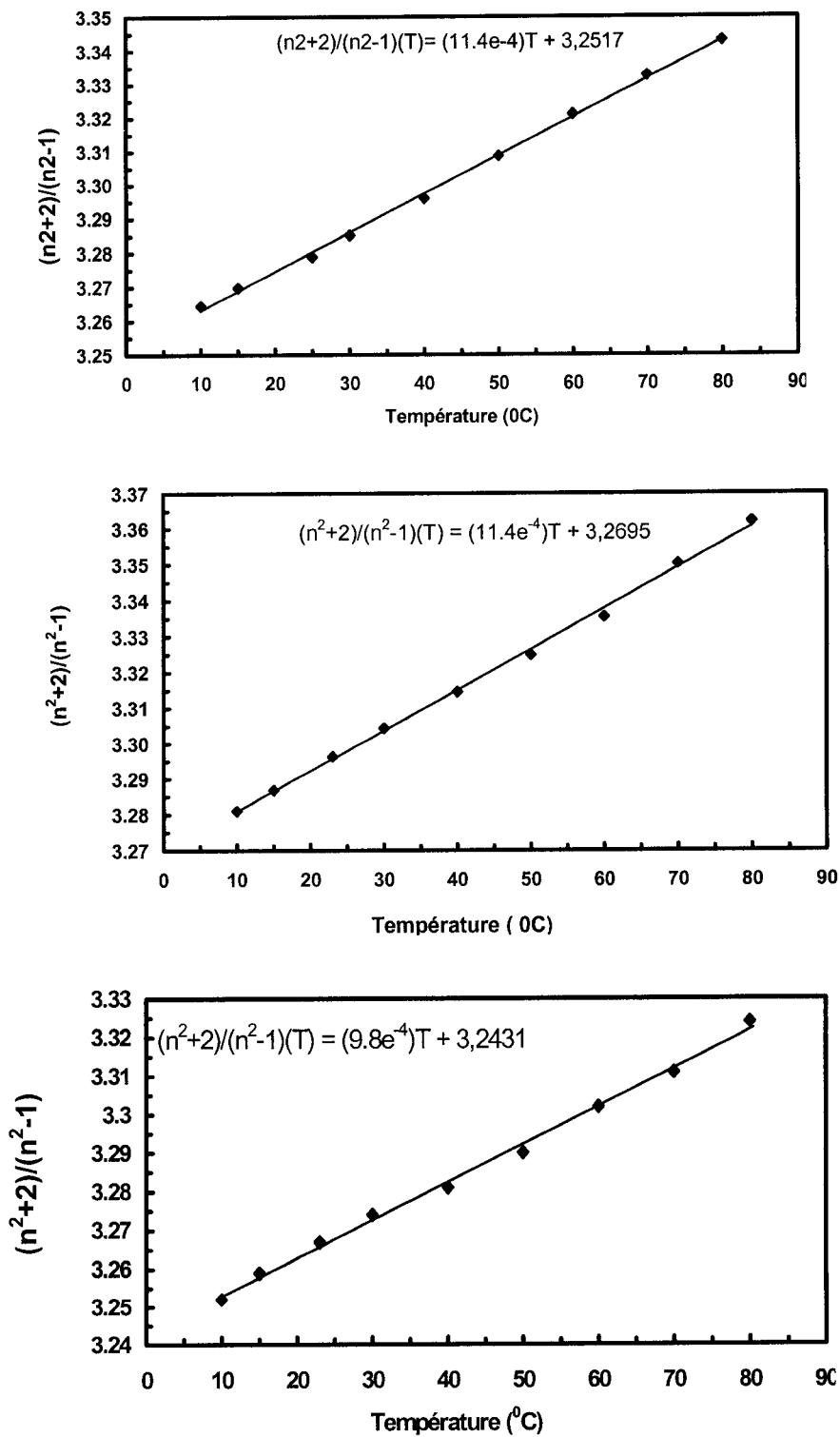
**Figure V-4 :** Variation de l'indice de réfraction en fonction de la température pour les échantillons 1, 2 et 3.

Ces résultats sont intéressants pour la fabrication des commutateurs (*switch*) thermo-optiques avec une biréfringence faible, dans la mesure où ils nous orientent vers un choix approprié des paramètres physiques du dispositif thermo-optique et vers les conditions convenables pour opérer (Comme le choix de la température où la biréfringence est zéro et que le changement de phase devrait être égal à  $\pi$ .). Notons que le coefficient thermo-optique (*TO*)  $dn/dT$  du verre hybride sol-gel est 10 fois plus grand que celui de silicium [Hid. Y. 93]

La **Figure V-6** représente, la variation de la fonction  $f_{LL}$  définie dans l'équation.V-2 pour les échantillons 1, 2 et 3,. Nous remarquons que les points expérimentaux varient linéairement le long de l'intervalle de température. Le lissage(*fit*) par rapport aux données donne le paramètre  $\alpha$  . Les décalages (*shift*) observés entre les fonctions  $f_{LL}$  des trois échantillons (1, 2 et 3), peuvent être dus à une différence de densification entre les trois échantillons.



**Figure V-5 :** Variation de la biréfringence en fonction de la température



**Figure V-6 :** Variation thermique de la fonction  $f_{LL} = (n^2+2)/(n^2-1)$  pour les échantillons 1, 2 et 3.

Le coefficient d'expansion volumique peut être déduit directement de l'expression  $\alpha = a/b$  [Mic. P. 86],

$$f_{LL} = \frac{n^2 + 2}{n^2 - 1} = aT + b \quad \text{Eq.V-3}$$

Les valeurs numériques calculées sont présentées dans le **Tableau V-2**, page 80.

Pour mieux comprendre l'effet du temps d'exposition à l'UV sur le coefficient d'expansion thermo-optique, nous avons préparé trois nouveaux échantillons avec une solution contenant 1/3 Zr et 2/3 AL et avec un même procédé de revêtement et de cuisson. Le temps d'exposition est 1, 2 et 3 min pour les échantillons 1, 2 et 3 respectivement. Les résultats sont exposés dans le **Tableau V-3**.

Pour un même procédé de revêtement et de pré-cuisson, les résultats montrent que le coefficient d'expansion thermique s'affaiblit lors de l'augmentation du temps d'exposition à l'UV.

**Tableau V-3 :** Paramètres de fabrication des films (guides d'onde plans) et les résultats de caractérisation,  $dn/dT$  et  $\alpha$  sont mesurés pour la polarisation TE

Solutions	Température de la pré-cuisson (°C)	Temps de la pré-cuisson (min)	Temps d'exposition à l'UV (min)	$dn/dT$ (°C <sup>-1</sup> )	$\alpha$ (°C <sup>-1</sup> )
Zr(1/3)Al(2/3)	60	15	1	-2.1x10 <sup>-4</sup>	3.59 x10 <sup>-4</sup>
Zr(1/3)Al(2/3)	60	15	2	-1.8 x10 <sup>-4</sup>	3.28 x10 <sup>-4</sup>
Zr(1/3)Al(2/3)	60	15	3	-1.6 x10 <sup>-4</sup>	2.68 x10 <sup>-4</sup>

### V.1.5 Conclusion

Nous avons mesuré la variation de l'indice de réfraction en fonction de la température pour trois échantillons fabriqués à partir d'une même solution sol-gel. La possibilité d'obtention d'une biréfringence égale à zéro a été démontrée par un ajustement du

traitement de la pré-cuisson et du temps d'exposition à l'UV. Cette propriété rendra possible la réalisation de dispositifs indépendants de la polarisation. La variation d'indice en fonction de la température ( $dn/dT$ ) pour la polarisation *TE* et *TM* est de l'ordre de  $-2 \times 10^{-4}/^{\circ}\text{C}$ . Nous n'avons observé aucun changement de phase, ce qui veut dire que l'indice de réfraction dépend seulement de la densité du matériau. Le coefficient d'expansion est déduit directement des mesures de l'indice de réfraction en fonction de la température.

La méthode utilisée ci-dessus pour la détermination du coefficient d'expansion thermique est rapide et simple. À notre connaissance, c'est la première fois qu'une étude de variation de l'indice de réfraction en fonction de la température est réalisée sur un verre hybride organique-inorganique sol-gel.

## V.2 Matériaux Polymères

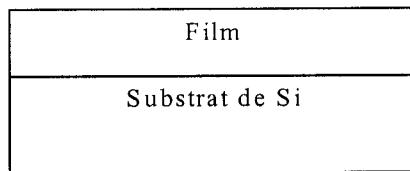
### V.2.1 Indice de réfraction et biréfringence d'un film déposé sur un substrat de Silicium

Le contrôle et la compréhension du phénomène de la biréfringence et de l'effet de la température sur les propriétés des matériaux est indispensable pour la fabrication des composants d'optique intégrée. Nous avons tenu compte de ce fait pour caractériser trois types de matériaux polymères qui constituent la structure des composants optiques *DWDM*, en l'occurrence, deux matériaux *BG* et *FG* des couches tampon et gaine ainsi que le matériau guide *SFG*, trois matériaux décrits dans le chapitre I.

Les trois types de matériaux sont déposés, chacun, sur un substrat Si (voir **Figure V-7**) par la méthode de la tournette. Ensuite, chaque film subit le traitement optimal de la microfabrication appropriée pour la microfabrication d'un *DWDM*.

Il est important de noter que l'indice de réfraction et la biréfringence intrinsèque d'un matériau sous forme de couche mince dépendent du procédé et du traitement que cette dernière a subi. Alors que la biréfringence induite par la structure sandwich, qui est la

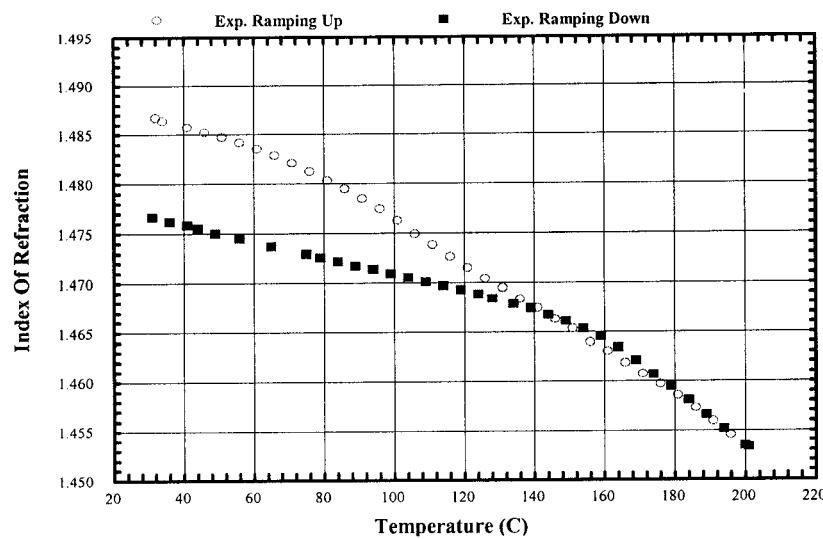
superposition de trois couches différentes, est beaucoup plus importante que la biréfringence intrinsèque de chacune des trois couches.



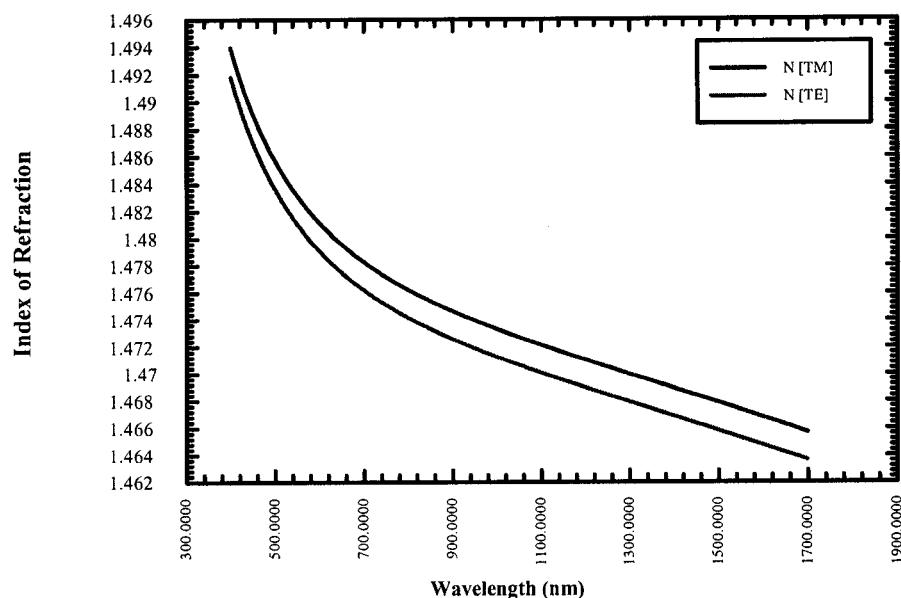
**Figure V-7** : Film déposé sur un substrat de silicium.

#### V.2.1.1 Copolymère *BG* pour la couche tampon

La **Figure V-8** montre la variation de l'indice de réfraction à  $632 \text{ nm}$  en fonction de la température ( $T < 200 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ) de la couche tampon d'épaisseur  $6.5 \text{ } \mu\text{m}$  de co-polymère *BG*. D'après cette figure, nous pouvons distinguer deux régions de linéarité de la variation d'indice en fonction de la température:  $20 \text{ }^{\circ}\text{C} < T < 140 \text{ }^{\circ}\text{C}$  et  $140 \text{ }^{\circ}\text{C} < T < 200 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , ces deux régions correspondent à deux états de phase différente de matériau *BG*, donc deux différentes propriétés thermo-optiques. Pour les températures inférieures à  $80 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , la linéarité de la variation d'indice en fonction de la température nous permet de déduire le coefficient thérmooptique (*TOC*), qui est de l'ordre de  $10^{-4} / \text{ }^{\circ}\text{C}$  pour les deux polarisations *TE* et *TM*, et celui d'expansion thermique qui est de l'ordre de  $2 \times 10^{-4} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ . La **Figure V-8** nous montre aussi, qu'à  $T = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , les valeurs de l'indice de réfraction du film de co-polymère *BG*, avant et après l'échauffement à  $200 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , sont différentes. Ceci témoigne d'un changement dans la structure du matériau ou de sa dégradation. En effet, la mesure de *TGA* (Thermal Gravimetry Analysis) montre que la température de dégradation du co-polymère *BG* est de  $185 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Donc, pour des applications où le dispositif optique pourrait être exposé à des températures supérieures à  $180 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , le co-polymère *BG* ne serait pas le bon choix pour la couche tampon.



**Figure V-8 :** La variation de l'indice de réfraction à  $632 \text{ nm}$  en fonction de la température ( $T < 200^\circ\text{C}$ ) dans la couche tampon de copolymère  $BG$ .



**Figure V-9 :** Variation de la biréfringence du film co-polymère  $BG$  de  $6.5 \mu\text{m}$  en fonction de la longueur d'onde.

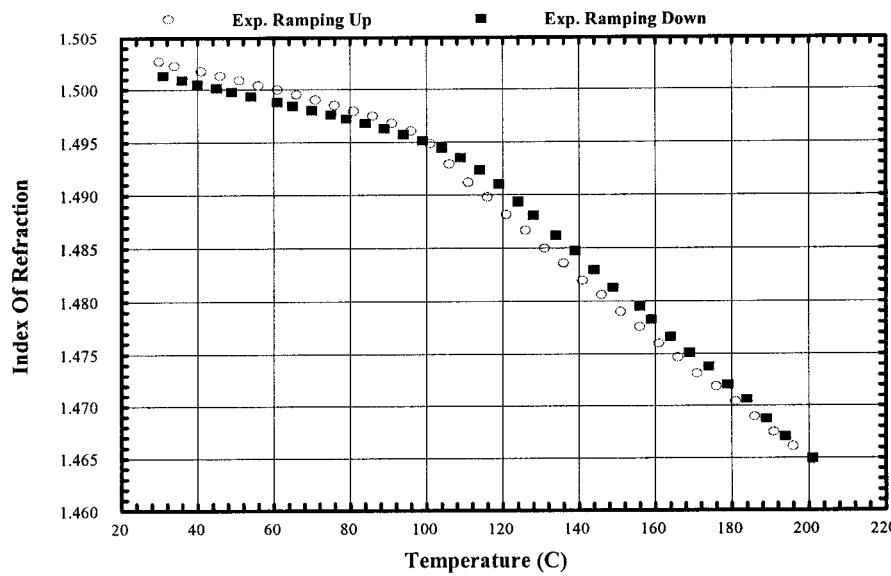
La **Figure V-9** montre la biréfringence du film copolymère  $BG$  de  $6.5 \mu\text{m}$  d'épaisseur en fonction de la longueur d'onde. La biréfringence du matériau co-polymère  $BG$  dans le spectre visible est faible comparativement à celle de la région de l'ultraviolet. D'où

l'importance du choix de la région de la longueur d'onde et aussi de la température, pour la réalisation des composants optiques *DWDM* insensibles à biréfringence.

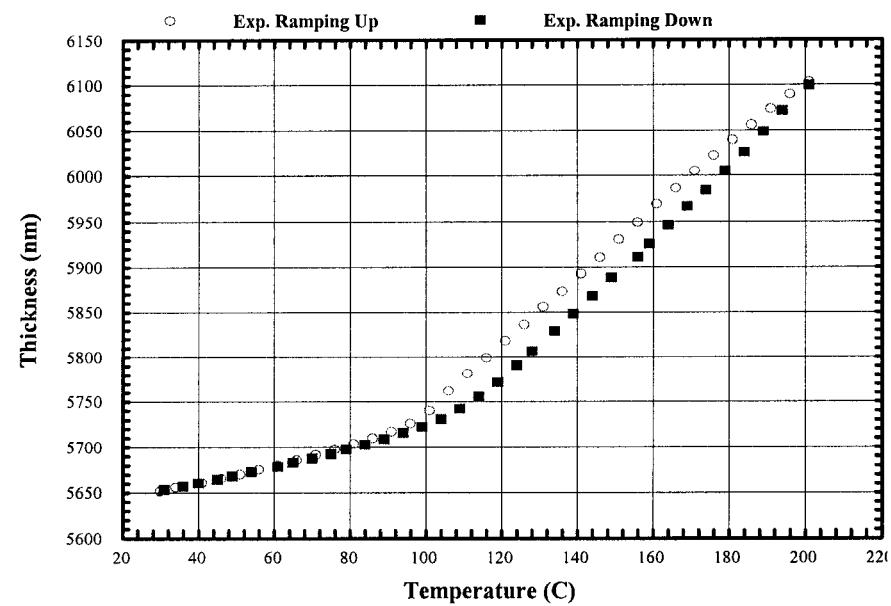
### V.2.1.2 Ter-polymère *SFG* pour la couche guidante

La **Figure V-10** montre la variation de l'indice de réfraction à  $632 \text{ nm}$  en fonction de la température ( $T < 200 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ) de la couche guidante du ter-polymère *SFG* d'épaisseur  $6.5 \mu\text{m}$ . Deux régions de linéarité de la variation de l'indice de réfraction en fonction de la température apparaissent sur la figure:  $20 \text{ }^{\circ}\text{C} < T < 100 \text{ }^{\circ}\text{C}$  et  $100 \text{ }^{\circ}\text{C} < T < 200 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Ces deux régions correspondent à deux états de phase différente du matériau guide, donc à deux différentes propriétés thermo-optiques. Pour les températures inférieures à  $100 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , le coefficient thérmooptique (*TOC*) de la couche guidante est de l'ordre de  $8.10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$  (dix fois plus faible que celui de la couche tampon *BG*) pour les polarisations *TE* et *TM* et le coefficient d'expansion thermique (*TEC*) et de l'ordre de  $1.5 \cdot 10^{-4} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ .

Contrairement au film de co-polymère *BG* dont les propriétés optiques ont été affectées par les hautes températures ( $< 200 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ), la **Figure V-10** montre, qu'à  $T = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , l'indice de réfraction de la couche guidante d'avant et d'après l'échauffement jusqu'à  $200 \text{ }^{\circ}\text{C}$  n'a subi aucun changement. Ce qui montre la stabilité de la structure du matériau ter-polymère *SFG*. Le spectre de mesure par la *TGA* de la **Figure V-13** montre que la température de dégradation du ter-polymère *PFS-SD-GMA* est supérieure à  $400 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .



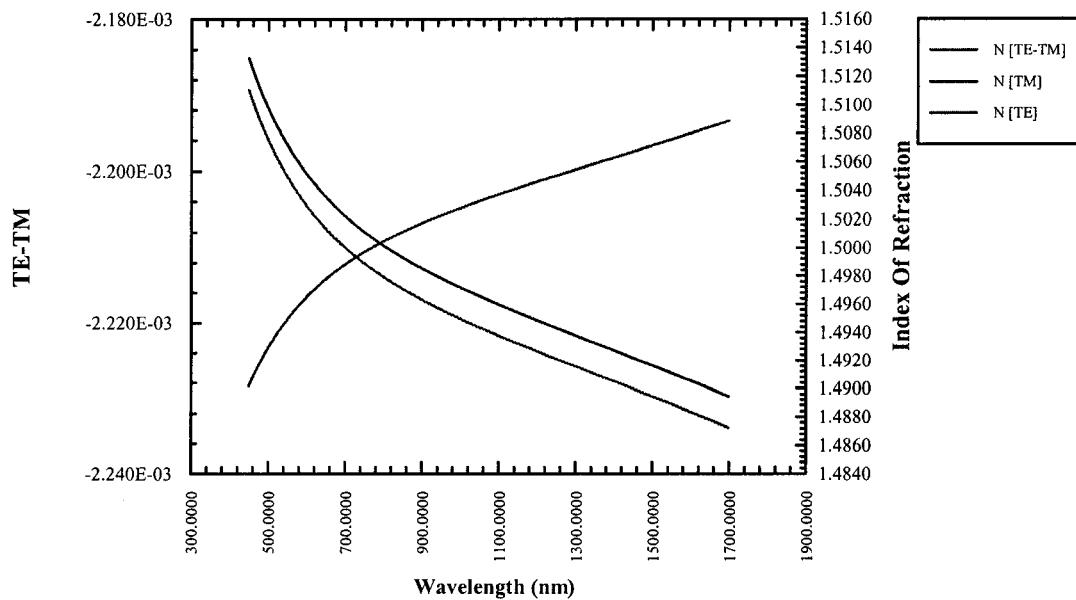
**Figure V-10 :** Variation de l'indice de réfraction à  $632 \text{ nm}$  en fonction de la température ( $T < 200 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ) dans la couche guidant du ter-polymère *SFG*.



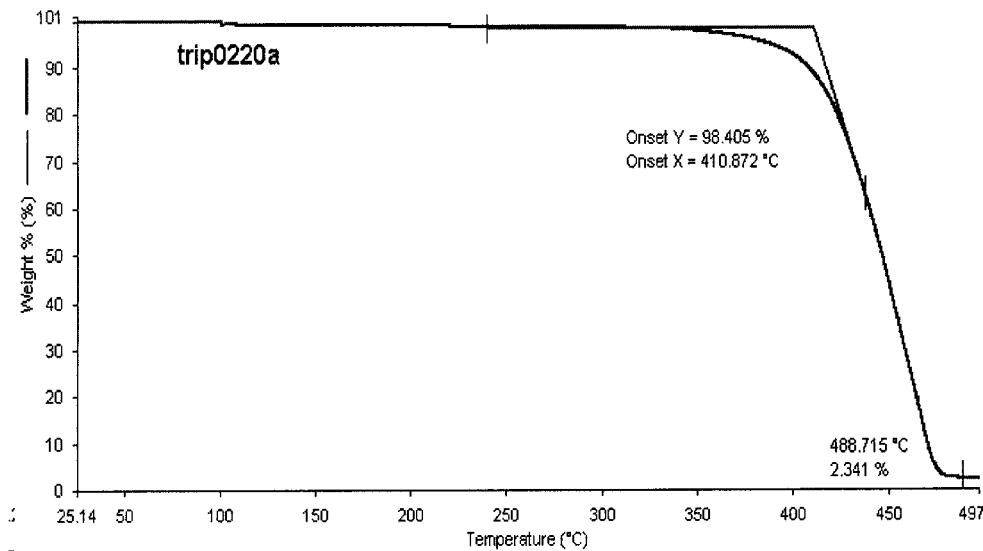
**Figure V-11 :** Variation de l'épaisseur en fonction de la température ( $T < 200 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ) dans la couche guidante du ter-polymère *SFG*.

La **Figure V-11** montre la variation de l'épaisseur de la couche guidante du ter-polymère *SFG*. Nous voyons d'après cette figure qu'à  $T = 200\text{ }^{\circ}\text{C}$  que la variation de l'épaisseur est de  $400\text{ nm}$ . Cette variation en épaisseur n'aura pourtant pas d'impact majeur sur le nombre de modes guidés dans la structure, mais elle peut affecter la réponse optique des *DWDM*, en affectant la diaphonie adjacente (*AXT*) et le décalage de la longueur d'onde centrale.

Dans la **Figure V-12**, nous avons montré la variation de la biréfringence en fonction de la longueur d'onde de la couche guidante du ter-polymère *SFG* d'épaisseur  $6.5\text{ }\mu\text{m}$ . Nous pouvons constater que la biréfringence dans la région du visible est faible comparativement à la région de l'ultraviolet.



**Figure V-12 :** Variation de la biréfringence de la couche guidante du ter-polymère *SFG* de  $6.5\text{ }\mu\text{m}$  d'épaisseur en fonction de la longueur d'onde.



**Figure V-13 :** Mesure de *TGA* pour le ter-polymère *SFG*.

## V.2.2 Indice de réfraction et biréfringence des structures complexes

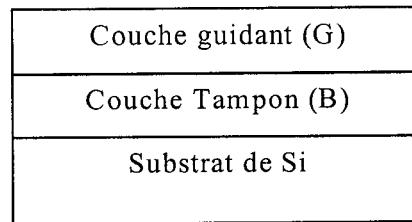
### V.2.2.1 Caractérisation optique de la couche guidante (G) de ter-polyère (SFG) déposée sur une couche tampon (B) de copolymère *BG*.

Pour comparer la biréfringence d'un seul film déposé sur un substrat de silicium (biréfringence intrinsèque du matériau) avec une structure plus complexe, proche de la structure réelle du composant optique, nous avons déposé une couche du guide ter-polymère *SFG* d'épaisseur  $10 \mu m$  sur une couche tampon de copolymère *BG* d'épaisseur  $5.6 \mu m$ , cette dernière est déposée sur un substrat de silicium comme schématisé dans la **Figure V-14**. Ensuite nous avons mesuré les propriétés optiques et thermo-optiques de la couche guidante.

Le **Tableau V-4** montre une faible biréfringence,  $7 \text{ à } 8.10^4$  de la couche guidant de ter-polymère (G) à faible température et l'augmentation de la température ( $T < 80 ^\circ C$ ) augmente la biréfringence à la valeur de  $1.5 \cdot 10^3$ . Contrairement au co-polymère *BG* qui a une biréfringence relativement faible de l'ordre de  $5 \cdot 10^4$ , l'augmentation de la température ( $T < 80 ^\circ C$ ) a un faible effet sur la biréfringence du copolymère *BG* comme

le montre la **Figure V-17**. C'est ce qui explique la grande variation de  $\Delta n$  ( $n_g - n_b$ ) qui est de l'ordre de  $10^{-3}$ , avec la température ( voir la **Figure V-16**).

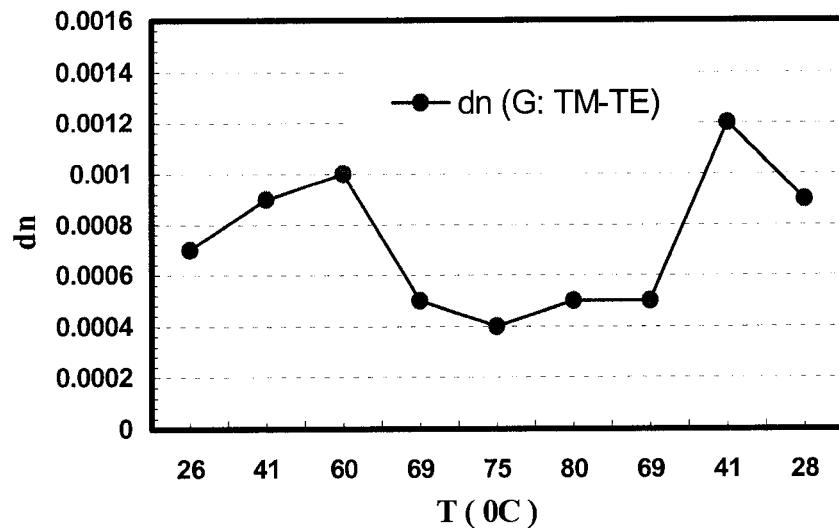
D'après les résultats ci-dessus, on réalise que le phénomène de la biréfringence est complexe et dépend de la composition du matériau, de la structure de composant, du procédé de fabrication et des conditions environnementales de fonctionnement du composant optique



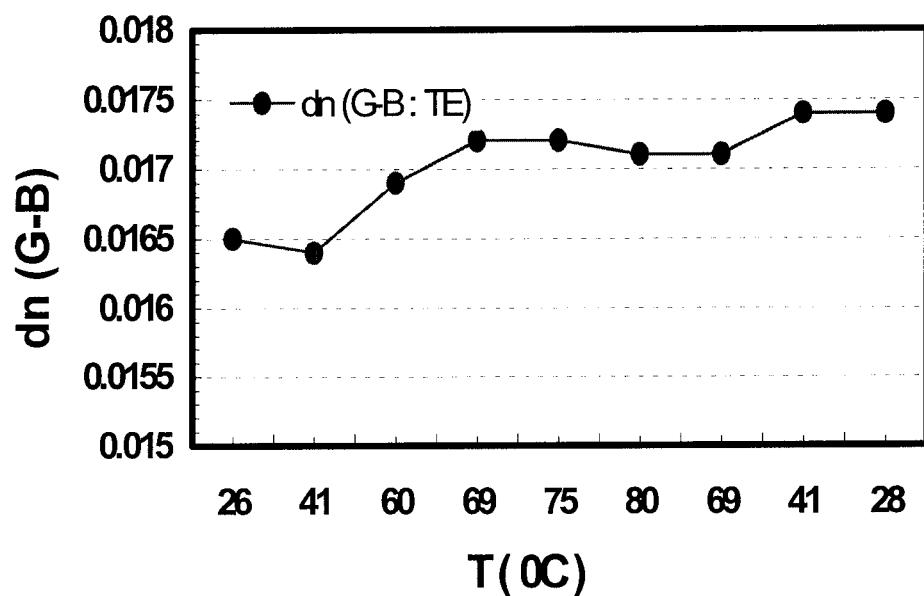
**Figure V-14 :** Schéma de la structure couche guidante /couche tampon /substrat de silicium.

**Tableau V-4 :** Résultats de mesure de l'indice de réfraction et de la biréfringence de la couche guidant ter-polymère (SFG) et de la couche tampon co-polymère (BG).

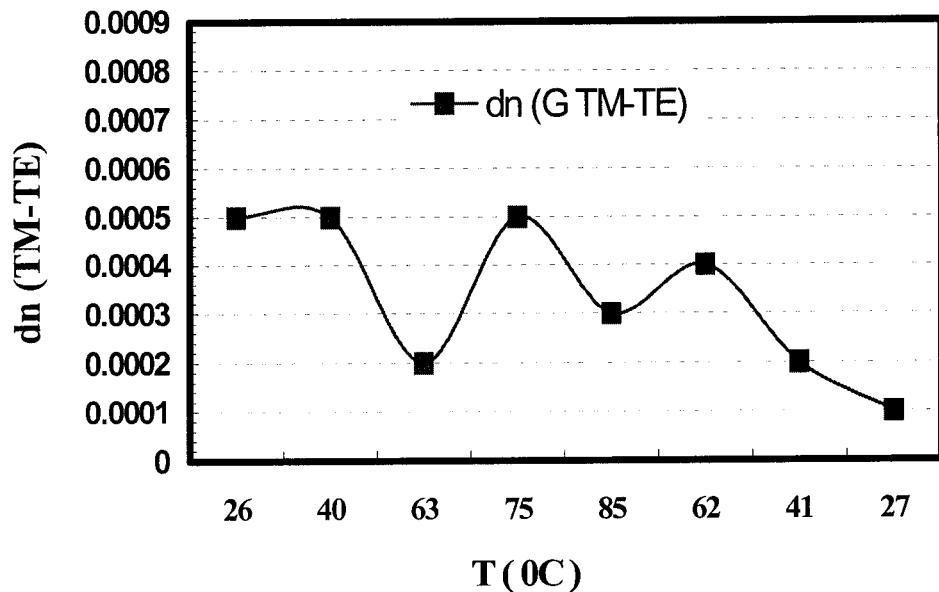
T (°C)	n <sub>TE</sub>		n <sub>TM</sub>	Δn (n <sub>g</sub> -n <sub>b</sub> )	Biréfringence du Guide	Épaisseur (μm)		
	Guide	Couche tampon	Guide			G(TE)	G(TM)	Couche tampon
26	1.4884	1.4719	1.4891	0.0165	7x10 <sup>-4</sup>	5.62	5.61	9.8
41	1.4865	1.4701	1.4874	0.0164	9x10 <sup>-4</sup>	5.68	5.69	9.86
60	1.4844	1.4675	1.4854	0.0169	1x10 <sup>-3</sup>	5.6	5.69	10
69	1.4836	1.4664	1.4841	0.0172	5x10 <sup>-4</sup>	5.61	5.59	10
75	1.4826	1.4654	1.483	0.0172	4x10 <sup>-4</sup>	5.61	5.65	10
80	1.482	1.4649	1.4825	0.0171	5x10 <sup>-4</sup>	5.61	5.65	10
69	1.4836	1.4665	1.4841	0.0171	5x10 <sup>-4</sup>	5.61	5.58	9.99
41	1.4861	1.4687	1.4873	0.0174	1.2x10 <sup>-3</sup>	5.59	5.63	9.96
28	1.4873	1.4699	1.4882	0.0174	9x10 <sup>-3</sup>	5.59	5.6	9.89



**Figure V-15 :** Biréfringence ( $n_{TM}-n_{TE}=dn$ ) de la couche guidante ter polymère (*SFG*) en fonction de la température.



**Figure V-16 :** Différence de l'indice de réfraction ( $\lambda=1.5\mu m$ ) entre la couche guidant (*SFG*) et la couche tampon du copolymère (*BG*) en fonction de la température.



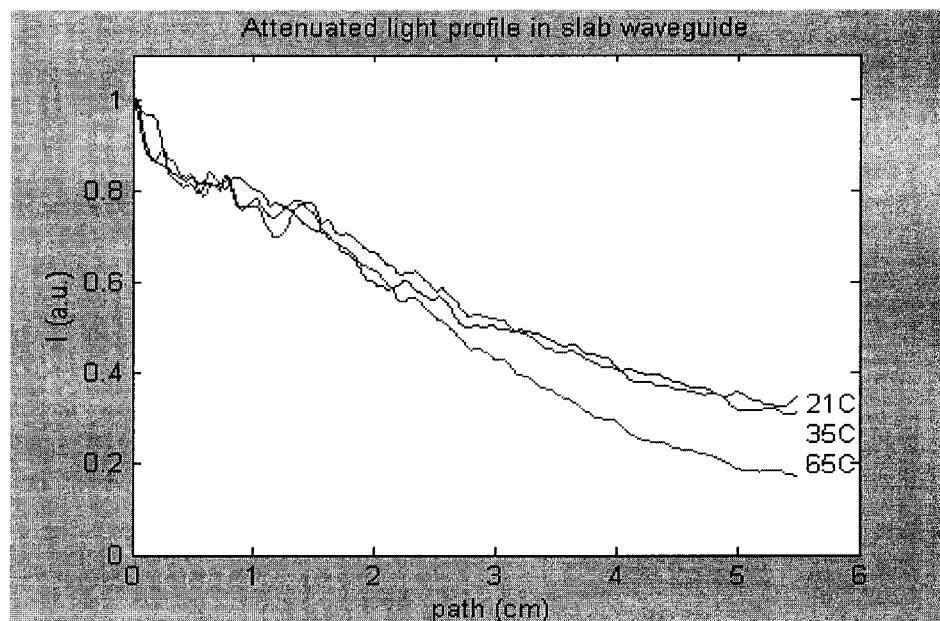
**Figure V-17 :** Biréfringence ( $n_{TM}-n_{TE}=dn$ ) de la couche tampon copolymère (*BG*) en fonction de la température.

D'après les résultats ci-dessus, nous réalisons que le phénomène de la biréfringence est complexe et dépend de la composition du matériau, de la structure du composant, du procédé de fabrication et des conditions environnementales de fonctionnement du composant optique.

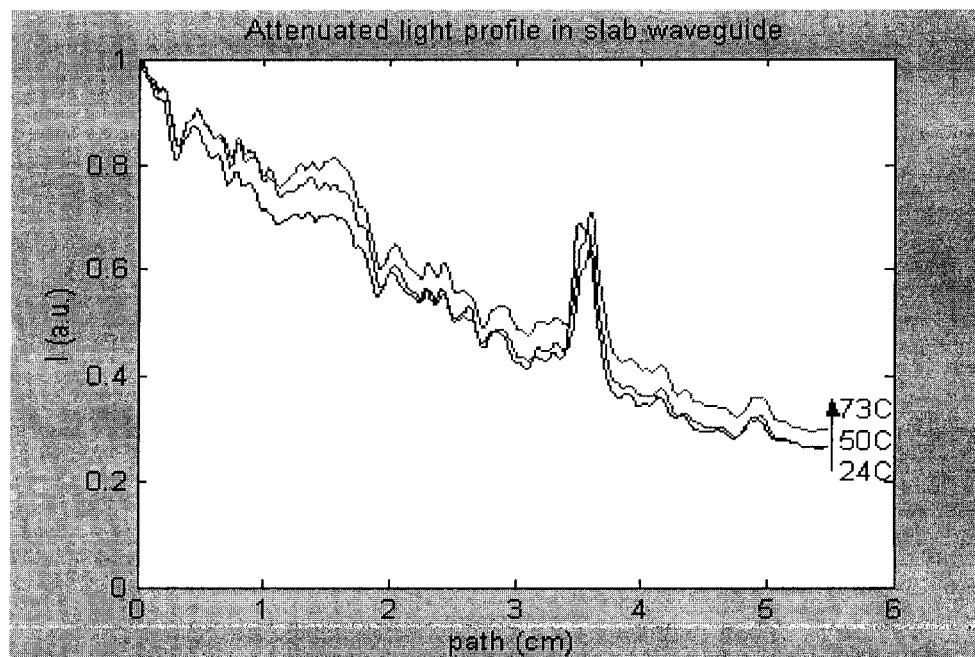
### V.2.3 Effet de la température sur la perte de propagation

D'après les résultats statistiques sur des guides d'onde plans, la température ( $T<80^{\circ}\text{C}$ ) n'affecte pas la perte de propagation dans une couche du guide plan ter-polymère *SFG* et copolymère *BG*. Les mesures ont été réalisées par la méthode de couplage par prisme, illustrée dans l'annexe A.

La variation, observée dans le profil d'atténuation de l'intensité de la lumière dans les deux guides plans de co-polymère *BG* (voir **Figure V-18**) et de ter-polymère *SFG* (voir **Figure V-19**), est due à la variation de l'indice de réfraction en fonction de la température. En conséquence, nous aurons une variation de la perte de radiation en fonction de la température.



**Figure V-18 :** Atténuation de l'intensité de la lumière ( $\lambda=1.5\mu\text{m}$ ) le long du guide d'ondes plan du copolymère *BG* en fonction de la température.



**Figure V-19 :** Atténuation de l'intensité de la lumière ( $\lambda=1.5\mu\text{m}$ ) le long du guide d'ondes plan du ter-polymère *SFG* en fonction de la température.

#### V.2.4 Composants AWG- insensibles à la température

Les polymères ont un coefficient thermooptique  $dn/dT$  approximativement dix fois plus grands que la silice. Les composants *AWG* à base de polymères peuvent être thermiquement accordés sur un spectre très large [Wat. T. 97] et peuvent être intégrés avec des commutateurs optiques de polymère pour former un multiplexeur de type "add-drop" à faible consommation de puissance de commutation [Bee. G. 99].

Le contrôle thermique de la longueur d'onde dans les dispositifs *AWG* est très souhaitable pour quelques demandes spécifiques. Cependant, pour stabiliser la longueur d'onde dans chaque canal du dispositif *AWG*, une unité de contrôle de température Peltier est nécessaire. Le fonctionnement de cette unité de contrôle de la température nécessite une puissance d'énergie permanente de quelques watts et un circuit électronique de contrôle. Pour éliminer ces dépenses supplémentaires, des dispositifs *AWG DWDM* insensibles à la température ou "athermal" ont été étudiés [Kok. Y. 94][Hei. G. 98].

Dans cette section, l'approche d'un composant tout-polymère "*all-polymer device*" insensible à la température, est présenté. Pour fabriquer ce type de composant, le choix du matériau polymère pour la couche du guide, de la gaine et le substrat s'avère très important. Ce choix se fait tout en appariant le coefficient d'expansion thermique ( $\alpha_{sub}$ ) positif du substrat et le coefficient thermooptique ( $dn/dT$ ) négatif des couches déposées sur le substrat.

Le comportement thermique du dispositif *AWG* a été étudié à l'aide d'un contrôleur de température Peltier. La longueur d'onde centrale d'un multiplexeur *AWG* peut être exprimée par l'équation suivante[Kok. Y. 94]:

$$d\lambda_0 / dT = (dn_g / dT + n_g \alpha_{sub}) (\lambda_0 / n_c), \quad \text{Eq. V-4}$$

où  $\lambda_0$  représente la longueur d'onde centrale,  $n_c$  l'indice effectif du guide d'ondes, et  $\alpha_{sub}$  le coefficient d'expansion thermique du substrat. Le coefficient thermo-optique ( $dn_g/dT$ ) du guide est négatif ( $-8 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ), tandis que celui de l'expansion thermique  $\alpha_{sub}$  du substrat est positif.

Le comportement athermal du dispositif *AWG* peut être réalisé si la valeur de  $\alpha_{sub}$  est choisie de telle sorte que la relation suivante:

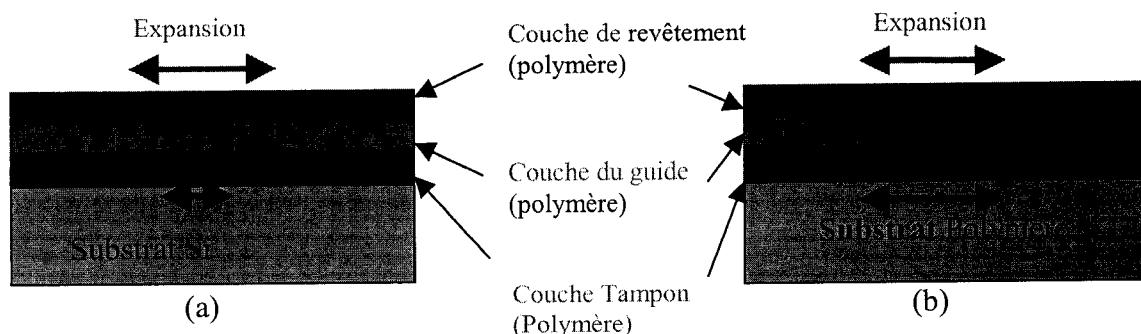
$$n_g \alpha_{sub} = |dn_g / dT|, \quad \text{Eq. V-5}$$

est satisfaite.

#### V.2.4.1 Résultats expérimentaux

Nous avons fabriqué des *AWG Corse DWM 1x4* et *AWG DWDM 8x8 100GHz* en utilisant le ter-polymère *SFG* et le copolymère *BG* comme matériau du guide et de couche gainage respectivement. Pour pouvoir comparer les performances athermiques des dispositifs *AWG*, nous avons utilisé deux types de substrats: un substrat silicium et un substrat polymère.

Nous avons schématisé dans la **Figure V-20** la structure tout polymère et celle avec un substrat de silicium. Le coefficient d'expansion thermique du substrat de silicium est très faible comparativement à celui du substrat de polymère.



**Figure V-20 :** Schéma de la structure Tout polymère (b) et de structure avec substrat de silicium (a).

Le décalage en longueur d'onde ( $d\lambda/dT$ ) dans les composants *CWDM* et *DWDM* , qui s'exprime par la formule:

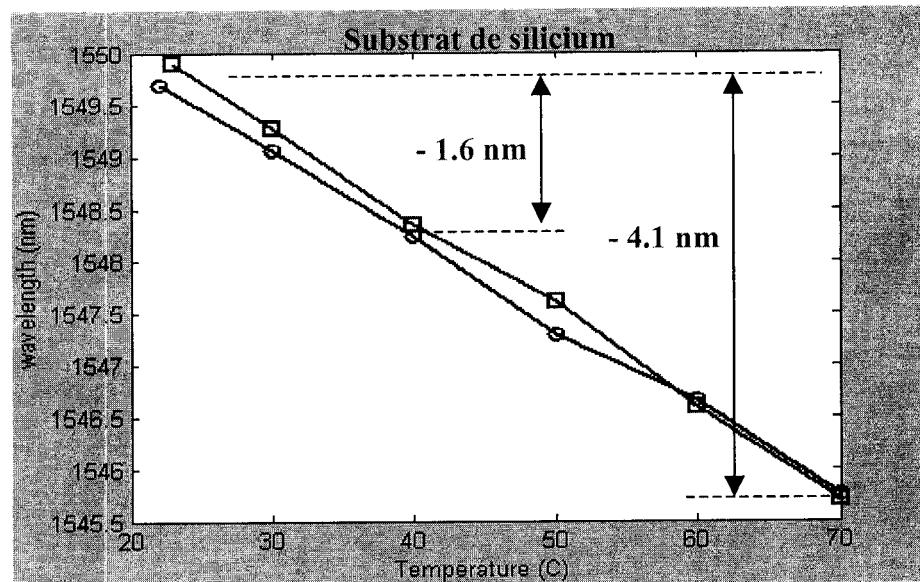
$$d\lambda/dT = dn_g/dT + n_g \alpha_{sub} (\lambda/n_g) \quad \text{Eq. V-6}$$

dépend des propriétés thermo-optiques,  $\alpha$  et  $dn/dT$ , des matériaux qui les constituent. La condition pour que la structure soit insensible à la température est  $d\lambda/dT = 0$ . Dans notre cas, le terpolymère  $dn_g/dT = -8 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$  et  $n_g = 1.485$ , donc, la valeur calculée de  $\alpha_{sub}$ , pour satisfaire à la condition athermal de l'équation V-5 est  $5.38 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$ .

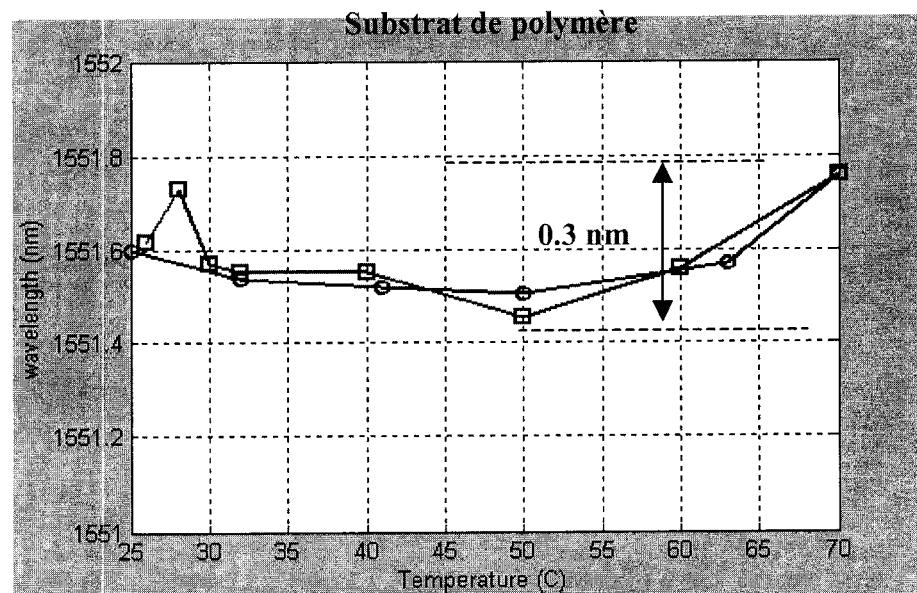
Du fait que,  $d\lambda/dT$ , des composants *AWG-DWDM* fabriqués sur le substrat de silicium est de l'ordre de  $0.08 \text{ nm}/^\circ\text{C}$  (Voir la **Figure V-21**). Ceci est dû au fait que le coefficient d'expansion thermique du substrat de silicium est  $2.8 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ .

Par contre, lorsque l'on remplace le substrat de silicium par un substrat de polymère, on obtient une structure tout polymère. Les coefficients d'expansions thermiques des différentes couches de la structure sont très similaires et que  $d\lambda/dT$  est de l'ordre de  $0.006 \text{ nm}/^\circ\text{C}$  comme le montre la **Figure V-22**

Les **Figure V-21** et **Figure V-22** montrent le décalage en la longueur d'onde dans un *AWG* avec un substrat en silicium et dans un *AWG* tout polymère respectivement. L'augmentation de la température entraîne un décalage négatif en longueur d'onde,  $d\lambda/dT < 0$ , dans le cas d'*AWG* fait sur un substrat de silicium. Pour le *AWG* fait sur un substrat de polymère,  $d\lambda/dT$  est très faible.



**Figure V-21 :** Décalage (*shift*) de la longueur d'onde en fonction de la température dans le cas d'un AWG avec substrat de silicium.

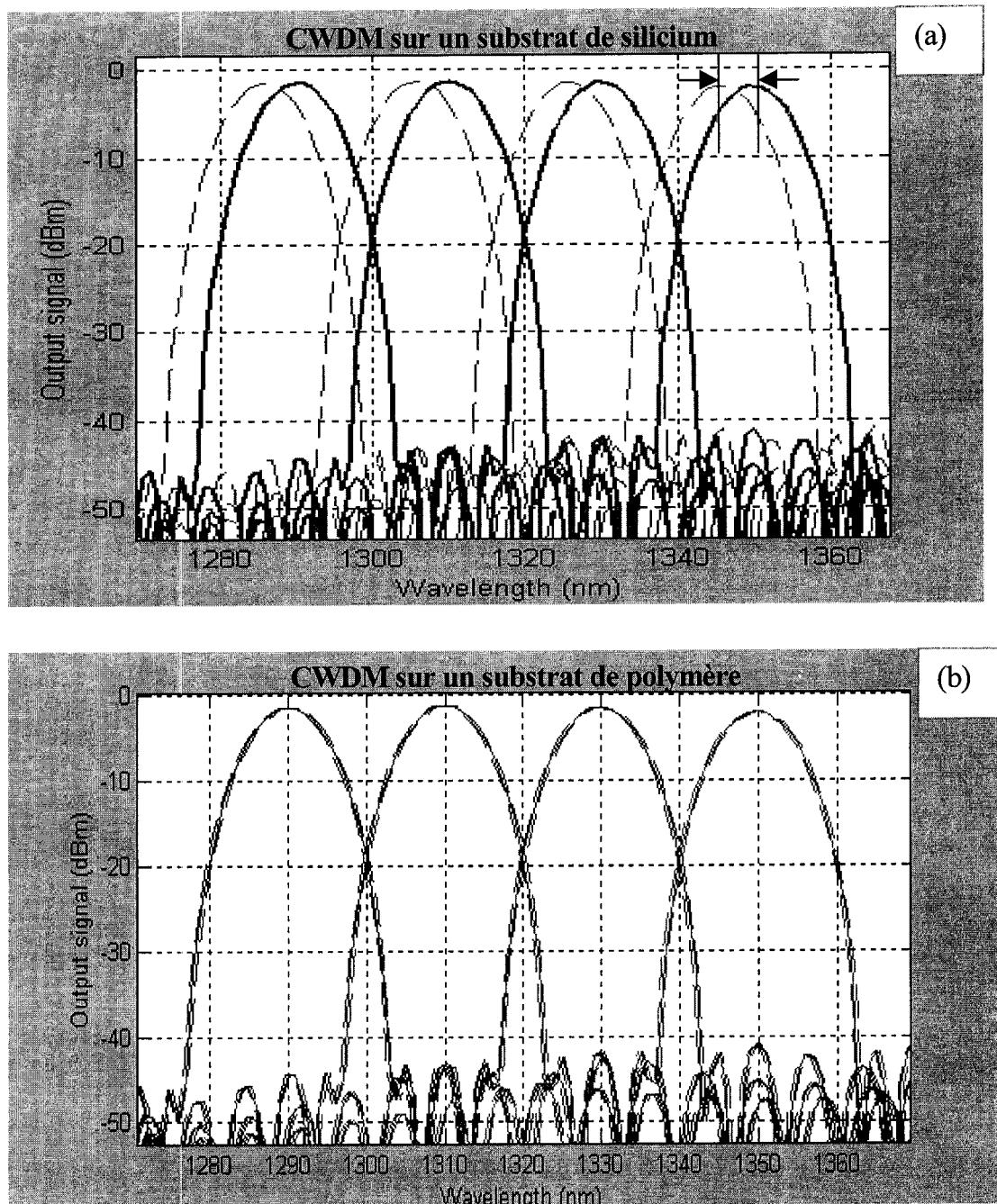


**Figure V-22 :** Décalage de la longueur d'onde en fonction de la température dans le cas d'un AWG tout polymère.

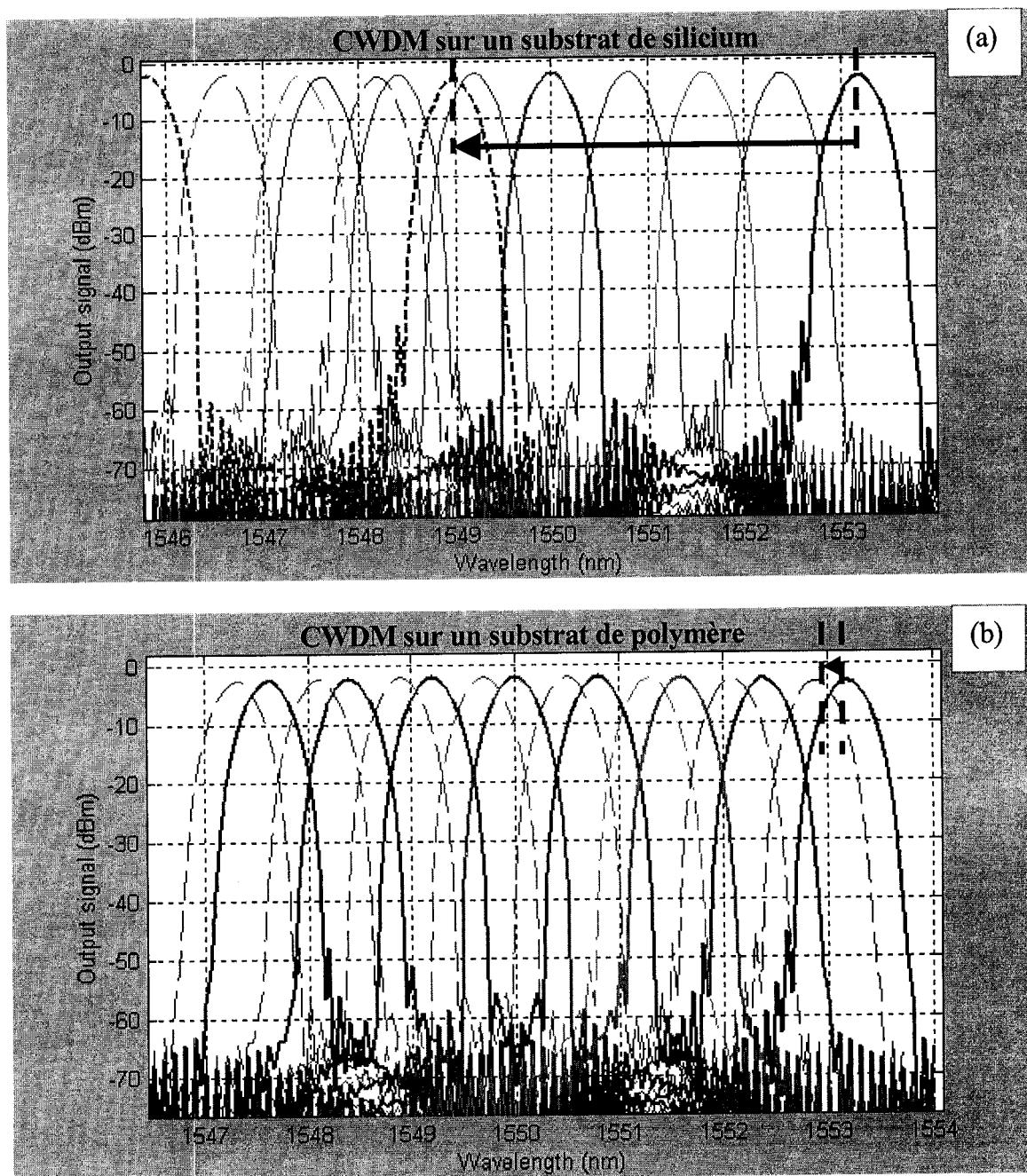
Dans les **Figure V-23** et **Figure V-24**, les courbes pleines représentent la réponse dans les conditions normales du laboratoire tandis que les courbes discontinues représentent la réponse optique de *AWG* à  $70^{\circ}C$ .

Les **Figure V-23** montrent la réponse optique expérimentale d'un *Corse DWM 1x4 20 nm* fait sur un substrat de silicium et sur un substrat du polymère respectivement. Nous voyons qu'il ya un décalage de la longueur d'onde manifesté par le *CWDM* à  $70^{\circ}C$ . Par contre le *CWDM* fait sur le substrat de polymère est quasiment insensible à la température ( $T < 70^{\circ}C$ ), d'où la réalisation d'un *CWDM* insensible à la température.

Les **Figure V-24** montrent la réponse optique expérimentale d'un *DWM 1x8 100GHz* fait sur un substrat de silicium et sur un substrat de polymère respectivement. Nous constatons qu'il ya un décalage de la longueur d'onde, à  $70^{\circ}C$ , qui est très large, de l'ordre de  $\Delta\lambda \sim 4.2nm$ , dans le cas de *DWDM* avec un substrat du silicium comparativement au *DWDM* tout polymère où le décalage à  $70^{\circ}C$  est  $\Delta\lambda \sim 0.3nm$ . Donc, dans le cas d'un *DWDM 100 GHz*, où la reponse optique est très sensible à la température, nous devons poursuivre la recherche afin d'optimiser le choix de substrat pour produire un *DWDM 100GHz* pratiquement athermique.



**Figure V-23 :** Effet du choix du substrat sur la réponse optique dans les conditions normales du laboratoire (courbes plates) et à 70 °C ( courbes discontinues) d'un CWDM (1x4 20 nm), fabriqué sur un substrat silicium et sur un substrat de polymère.



**Figure V-24 :** Effet du choix du substrat sur la réponse optique dans des conditions normales de laboratoire (courbes plates) et à 70 °C ( courbes discontinues) d'un DWDM (8x8 100 GHz) fabriqué sur un substrat de silicium et sur un substrat de polymère.

### V.2.5 Conclusion

Après avoir expérimenté plusieurs combinaisons de matériaux, nous concluons que la biréfringence et les phénomènes dépendants de la température sont évidents, mais leur effet est complexe sur les performances optiques d'un composant *DWDM*. Nous constatons que même avec des matériaux non biréfringents, après la construction d'une structure sandwich peut conduire à des composants biréfringents. Inversement, des matériaux biréfringents combinés dans une structure sandwich, peuvent engendrer un composant optique non biréfringent. D'où le compromis entre le choix du matériau et l'optimisation du procédé de la microfabrication est indispensable pour la réalisation des composants optiques non biréfringents. Les composants *AWG*, tout-polymère, ont été fabriqués et caractérisés. Ces dispositifs montrent des bonnes performances optiques en terme de perte d'insertion, de diaphonie et de dépendance à la polarisation et à la température. Nous avons démontré que le décalage (*shift*) de la longueur d'onde en fonction de la température dans un *AWG* peut être contrôlé en ajustant la valeur du coefficient de l'expansion thermique ( $\alpha_{sub}$ ) du substrat de polymère. À cette fin, nous avons fabriqué et caractérisé des dispositifs *AWG* dont la réponse optique est insensible à la température en appariant correctement le coefficient d'expansion thermique  $\alpha_{sub}$  du substrat et le coefficient thermo-optique  $dn/dT$  du guide.

## CHAPITRE VI. CONCEPTION ET FABRICATION DE COMPOSANT *DWDM* MONO-MODE

### VI.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous nous intéresserons aux composant *DWDM* mono-modes. Nous nous sommes fixé comme objectif de fabriquer ces composants avec un rendement optimal. Pour cela, nous avons essayé de respecter les conditions suivantes:

- Optimisation des paramètres géométriques, les dimensions des guides d'ondes,
- Optimisation des paramètres optiques, les indices de réfractions des différentes couches, substrat, guide et couvercle pour le *DWDM 16X16 100 Ghz*.
- Évaluation des pertes de courbure pour deux procédés différents A et B.
- Élimination des effets des modes supérieurs sur la réponse optique du *DWDM*.
- Amélioration et optimisation du design.

### VI.2 Expérience

Pour réaliser les expériences menant à la fabrication et à la conception des composants *DWDM* mono-modes, nous avons suivi deux procédés identifiés par A et B qui assurent seulement le guidage du mode fondamentale. Les masques conçus pour les composants *DWDM 16X16 100GHz* mono-mode sont représentés dans les **Figure VI-1** et **Figure VI-2**. Les motifs de la partie supérieure gauche des deux figures, représentent des guides d'onde courbés avec différents rayons de courbure, variant de *1.5 mm* à *9 mm*, servant à évaluer la perte due à la courbure du guide. Dans la partie supérieure droite, nous avons conçu des diviseurs de puissance *1x8* à jonction *Y*. La partie inférieure des

deux figures contiennent deux motifs de composants *DWDM* avec différents rayons de courbure.

### Procédé A

$$0.008 < \Delta n < 0.0012,$$

$$5.5 \mu\text{m} < \text{dimension du guide} < 6.5 \mu\text{m}$$

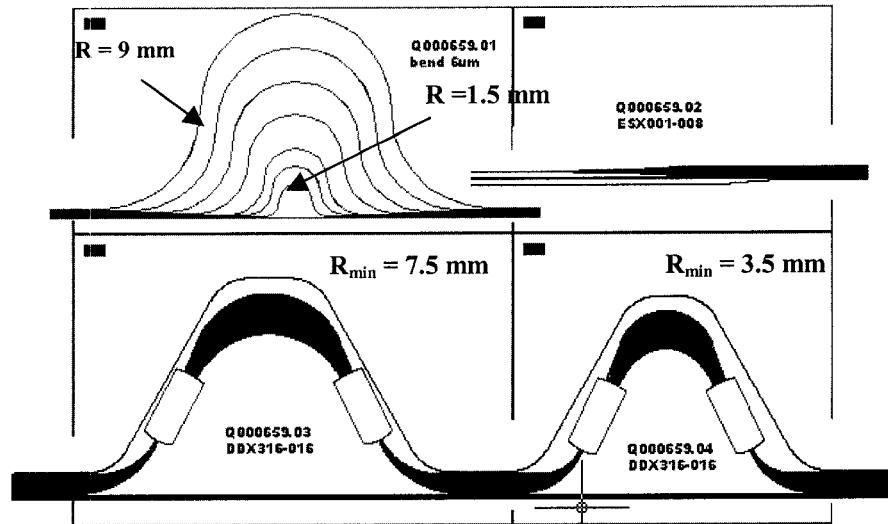


Figure VI-1 : Motifs conçus pour le procédé A.

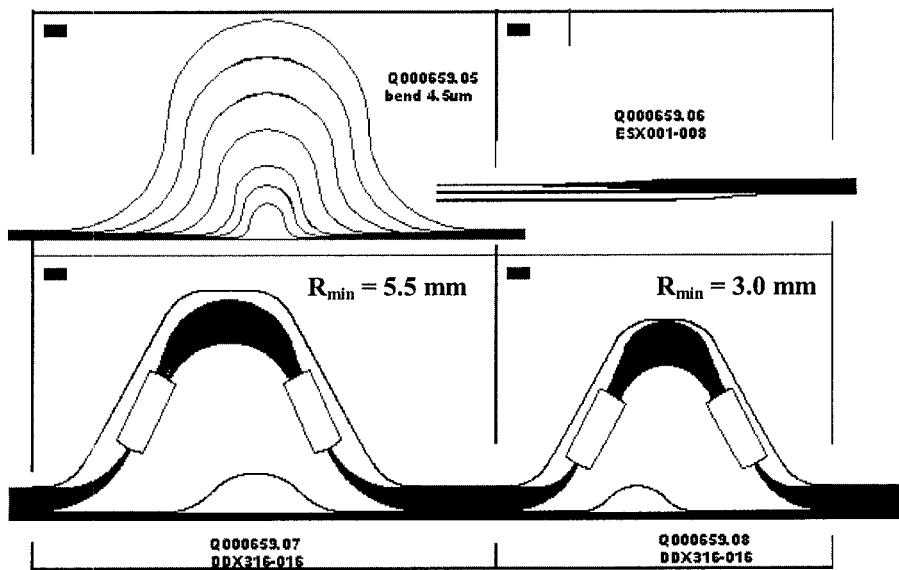


Figure VI-2 : Motifs conçus pour le procédé B.

### **Procédé B**

$0.013 < \Delta n < 0.0017$ ,

$4.5 \mu m < \text{dimension du guide} < 5.5 \mu m$ .

La liste des dispositifs testés, les dimensions des guides et les indices de réfraction des différentes couches des dispositifs sont représentés dans le **Tableau VI-1**. Les valeurs des dimensions et des indices de réfraction sont très comparables aux spécifications du design. Il est important de noter que pour le procédé A,  $\Delta n$  est asymétrique. Il est de même pour le procédé B.

## **VI.3 Résultats**

### **VI.3.1 Mesure de pertes de courbure**

Pour connaître les pertes de courbure dans un guide canal courbé, nous mesurons en premier lieu la perte de propagation ( $PP$ ) dans un guide canal droit dont la perte de courbure est pratiquement nulle. Ensuite, en utilisant la valeur de la perte due au couplage ( $PC$ ) qui a été mesurée pour quelques échantillons et estimée théoriquement et expérimentalement pour d'autres, nous déduisons la perte de propagation (en  $dB/cm$ ) qui est à l'aide de l'équation suivante:

$$PP = \frac{PI_s - PC}{l_s}, \quad \text{Eq. VI-1}$$

où  $PI_s$  désigne la perte d'insertion dans le guide canal droit,  $PC$  représente la perte de couplage et  $l_s$  est la longueur du guide canal droit.

D'autre part, la valeur de  $PP$  est utilisée pour le calcul de la perte de courbure ( $BL$ ) comme suit:

$$BL = PI_B - PI_s + (l_B - l_s)PP, \quad \text{Eq. VI-2}$$

où  $PI_B$  et  $PI_s$  sont respectivement les pertes d'insertions dans le guide canal courbé et droits.  $l_B$  et  $l_s$  sont respectivement les longueurs du guide canal courbé et du guide droit. La valeur de la perte de couplage est supposée être la même pour le guide droit et le guide courbé, car les dimensions et les indices de réfraction des guides courbé et droit sont pratiquement les mêmes.

En utilisant l'équation VI-1, nous obtenons:

$$BL = PI_B - \frac{l_B}{l_s} PI_s + \left( \frac{l_B}{l_s} - 1 \right) PC. \quad \text{Eq. VI-3}$$

La perte de courbure par  $cm$  (en  $dB/cm$ ) est calculée comme suit:

$$BL_{cm} = BL / l'_B, \quad \text{Eq. VI-4}$$

où  $l'_B$  est la longueur de la partie courbée du guide canal.

Nous pouvons calculer l'incertitude de mesure de la perte de courbure  $BL$  en utilisant l'expression de  $l'_B$ . Nous avons alors:

$$\delta(BL_{cm}) = \frac{1}{l_s} \left( 1 - \frac{2}{\pi} \right) \delta PC, \quad \text{Eq. VI-5}$$

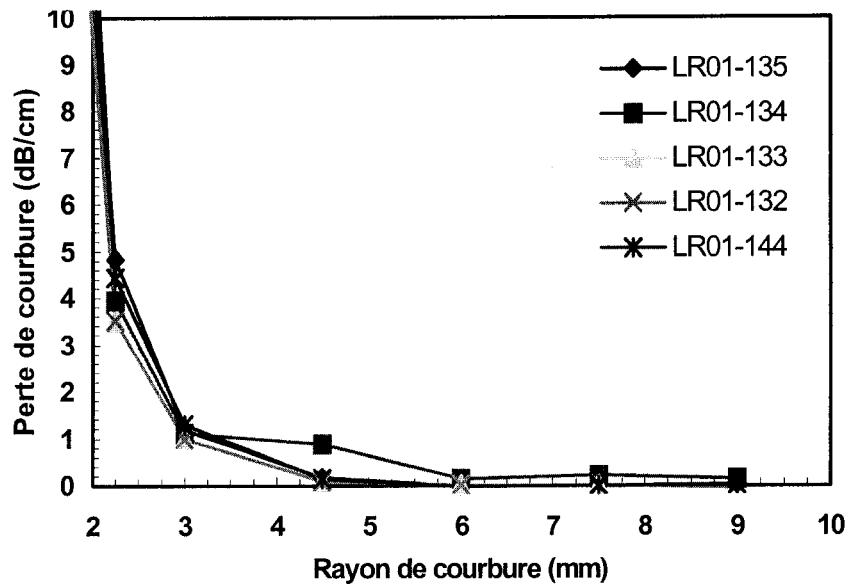
$$\delta(BL_{cm}) = 0.09 \delta PC \ll \delta PC \quad (dB/cm). \quad \text{Eq. VI-6}$$

L'incertitude de mesure de la perte de courbure dépend seulement de l'incertitude de mesure sur la perte de couplage, cette dernière étant  $\sim 10$  fois plus faible.

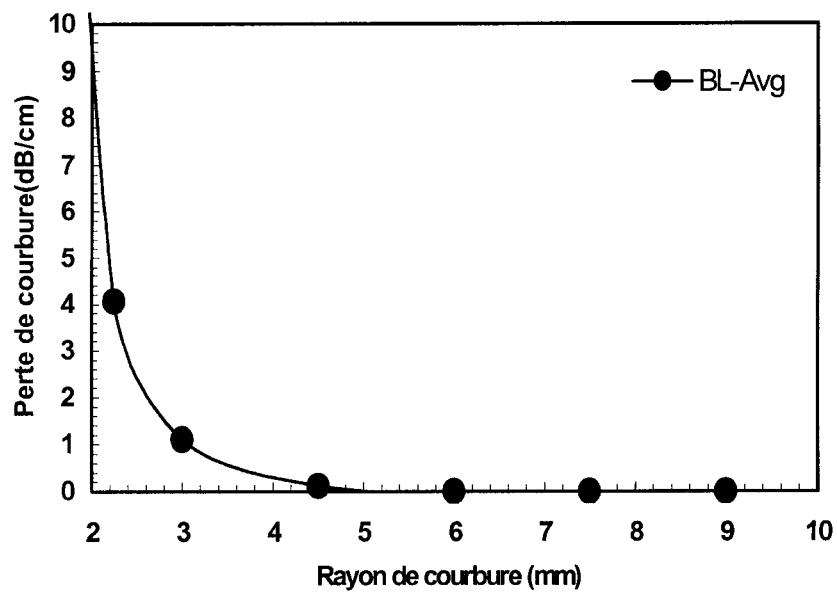
La **Figure VI-3** montre la mesure de la perte de courbure (en  $dB/cm$ ) réalisée sur 5 échantillons de type A. La valeur moyenne de ces mesures est montrée dans la **Figure VI-4**, tandis que la **Figure VI-5** montre la perte de courbure mesurée sur trois différents échantillons de type B en fonction du rayons de courbures et la **Figure VI-6** représente la moyenne de la perte de courbure des échantillons de type B.

**Tableau VI-1 :** Paramètres des guides d'ondes des échantillons fabriqués et testés.

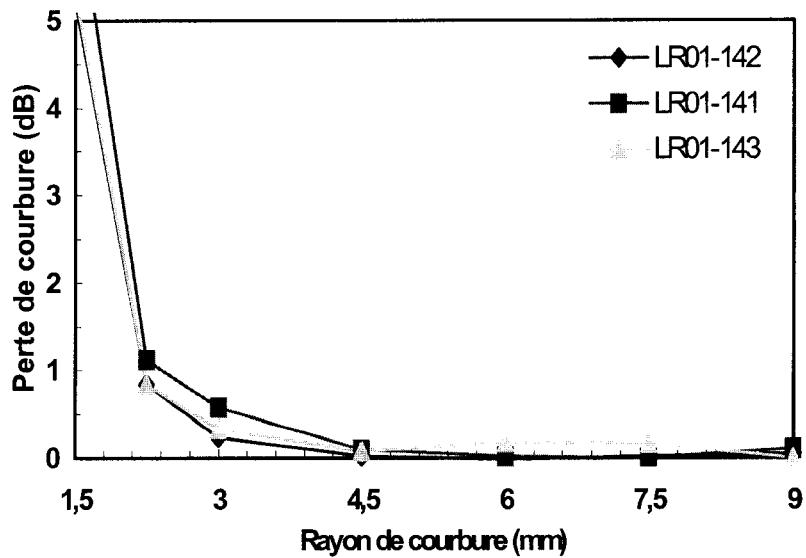
Échantillons A								
	Désigne	LR01-132	LR01-133	LR01-134	LR01-135	LR01-137	LR01-144	LR01-145
Hauteur (μm)	5.5 - 6.5	6.5	6.5	6.4	6.4	5.8	5.5	5.6
Largueur (μm)	5.5 - 6.5	6.1	6.9	6.9	6.5	6.1	7.3	6.9
$n_{cl}$	1.476 - 1.480	1.4759	1.4759	1.4759	1.4759	1.4758	1.4758	1.4758
$n_g$	1.486 - 1.490	1.4865	1.4865	1.4867	1.4867	1.4848	1.4861	1.4861
$n_b$	1.476 - 1.480	1.4780	1.4780	1.4780	1.4780	1.4724	1.4782	1.4782
$n_g - n_{cl}$	0.008 - 0.012	0.0106	0.0106	0.0108	0.0108	0.0090	0.0103	0.0103
$n_g - n_b$	0.008 - 0.012	0.0085	0.0085	0.0087	0.0087	0.0124	0.0079	0.0079
Échantillons B								
	Désigne	LR01-138	LR01-139	LR01-140	LR01-141	LR01-142	LR01-143	
Hauteur (μm)	4.5 - 5.5	5.3	4.6	5.0	4.5	4.8	4.8	
Largueur (μm)	4.5 - 5.5	5.0	4.2	5.0	5.0	4.6	5.4	
$n_{cl}$	1.471 - 1.475	1.4726	1.4726	1.4726	1.4726	1.4726	1.4726	
$n_g$	1.486 - 1.490	1.4849	1.4850	1.4855	1.4840	1.4847	1.4847	
$n_b$	1.471 - 1.475	1.4720	1.4731	1.4723	1.4710	1.4701	1.4701	
$n_g - n_{cl}$	0.013 - 0.017	0.0123	0.0124	0.0129	0.0114	0.0121	0.0121	
$n_g - n_b$	0.013 - 0.017	0.0129	0.0119	0.0132	0.0130	0.0146	0.0146	
Notes		déformé		DWDM endommagé				



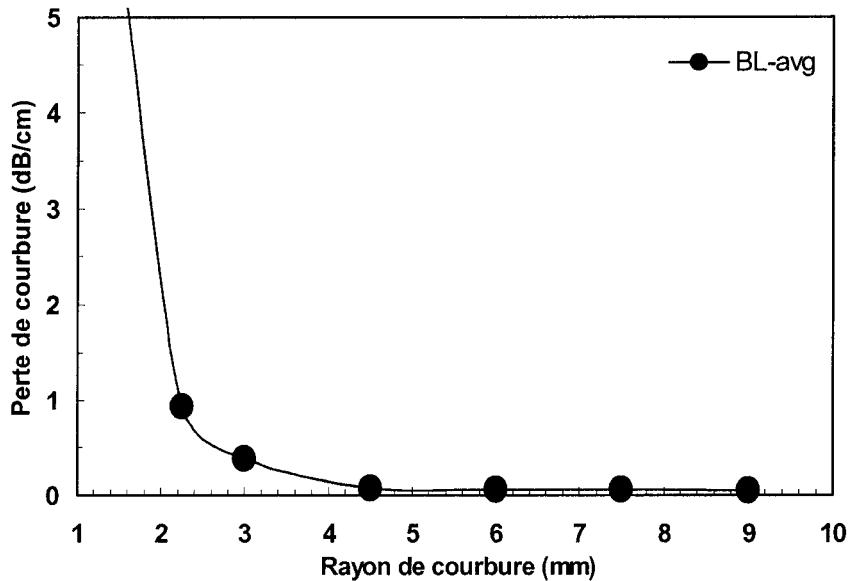
**Figure VI-3 :** Perte de courbure en fonction du rayon de courbure pour cinq différents échantillons de type A.



**Figure VI-4 :** Moyenne de la mesure de la perte de courbure en fonction du rayon de courbure pour cinq échantillons de type A.



**Figure VI-5 :** Perte de courbure en fonction du rayon de courbure pour trois différents échantillons de type B.



**Figure VI-6 :** Moyenne de la perte de courbure en fonction du rayon de courbure des trois échantillons de type B.

### VI.3.2 Mesure de perte de couplage

La mesure de perte de couplage est réalisée sur des guides canaux droits et courts ( $1\text{mm}$  à  $4\text{mm}$ ). Les résultats sont présentés dans le **Tableau VI-2**. Au cours de ces mesures, les

pertes ont été mesurées entre la source et le détecteur de puissance (*power meter*) à travers l'échantillon. La valeur trouvée comprend les pertes entre deux connecteurs ainsi que les pertes de couplage à l'entrée et à la sortie du guide. La référence de puissance est prise entre la source et le détecteur à travers un seul connecteur.

La moyenne de perte de couplage pour les échantillons de type A testés est **1.2 dB**.

**Tableau VI-2** : Perte de couplage mesurée sur les échantillons de type A.

Échantillons	LR-0132	LR-0133	LR-0134	LR-0135	LR-0137	LR-0144	LR-0145
Perte de couplage - Dir-Ref	0.95	1.17	1.14	1.16	1.24	1.30	1.5
Notes							Puissance instable

### VI.3.3 Mesure des Pertes de propagation

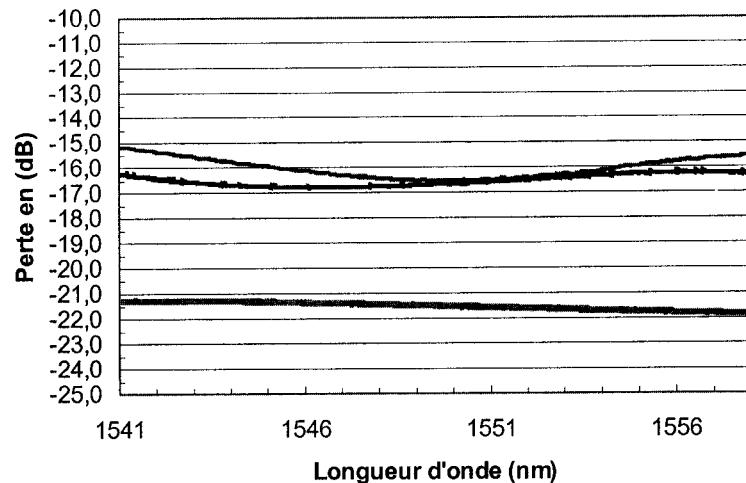
La perte de propagation a été mesurée par la méthode de "cut-back" sur des guides canaux droits. Les pertes de couplage dont les valeurs sont reportées dans le **Tableau VI-2** ont été utilisées dans le calcul de la perte de propagation pour certains échantillons. La moyenne de la perte de propagation des 9 échantillons A et B est de **0.78 dB/cm**.

#### VI.3.3.1 Nombre de modes

Même si nous n'avons pas réalisé la visualisation du profil des modes supportés par le guide canal par le biais d'une caméra IR, d'autres observations nous ont permis de connaître si le guide est mono-mode. En effet, de la réponse optique des deux guides droits et d'un guide courbé, représentée dans la **Figure VI-7**, nous observons que les valeurs maximale et minimale de la perte d'insertion et la planéité de la réponse optique pour les trois guides ainsi que l'uniformité de la réponse optique entre les trois guides manifestent une faible fluctuation dans un intervalle de **20 nm** (voir le **Tableau VI-3**). De plus, la puissance du deuxième pic, correspondant au mode d'ordre *1* dans la réponse optique des *DWDM*, est très faible. Ceux ci indiquent que les guides sont pratiquement mono-mode, et même s'il existe un deuxième mode, celui-ci est faiblement guidé (*cut-off*).

**Tableau VI-3 :** Fluctuation et uniformité de la perte d'insertion dans deux guide canaux droits et un guide courbé. La réponse optique est présentée dans la **Figure VI-7**

	PI <sub>min</sub> (dB)	PI <sub>max</sub> (dB)	PI <sub>moy.</sub> (dB)	Planéité (dB)	Uniformité (dB)			
					Canal Droit- 1	Canal droit- 2	Canal courbé- b	Canal droit- 4
Canal droit -1	16.2	16.8	16.5	0.6	NA	1.1	5.6	
Canal droit- 2	15.2	16.5	16.1	1.4	1.1	NA	6.3	
Canal courbé- b	21.3	21.8	21.5	0.5	5.6	6.3	NA	
Canal droit- 4								



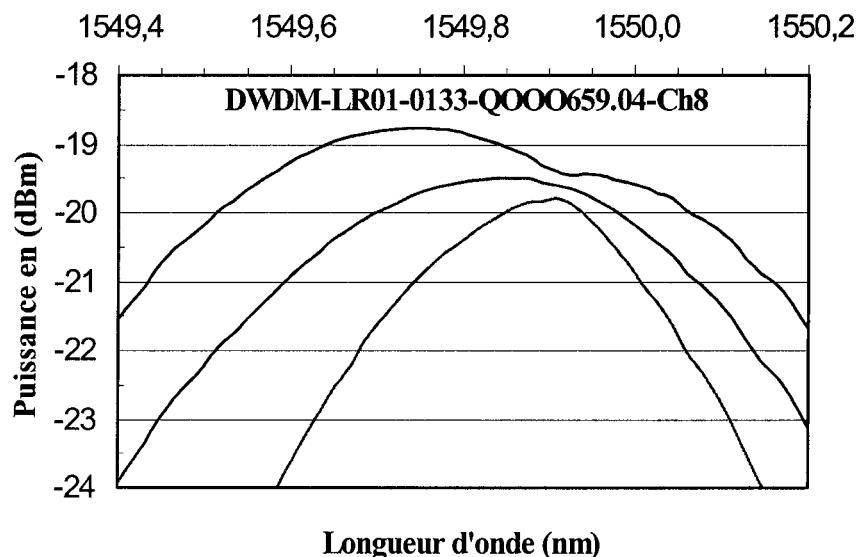
**Figure VI-7 :** Perte d'insertion de deux guides droits et un guide courbé.

#### VI.3.4 Résultats des DWDM

Le **Tableau VI-5** résume les résultats obtenus sur les DWDM de type A et B. Le rayon minimum des différents composants *DWDM* est représenté dans la deuxième ligne tandis que la troisième ligne contient la longueur du chemin optique en *cm* pour les différents composants *DWDM* testés. Les pertes d'insertion sont calculées en effectuant la moyenne des 3 valeurs de perte d'insertion correspondant aux trois meilleurs canaux parmi les canaux 7 , 8, 9 et 10 représentés dans la quatrième ligne. Dans la cinquième ligne, nous

avons rapporté la valeur moyenne de la perte d'insertion (*IL*) des canaux extérieurs (canaux 1 et 16). La *PDL-L* (*PDL-R*) est approximativement la différence entre la perte d'insertion (*IL*) mesurée avec une source non polarisée et une source (polarisée) dont la polarisation est ajustée dans le canal central (le numéro 8).

La **Figure VI-8** montre la réponse optique du canal central d'un *DWDM* à une source polarisée et non polarisée. Tandis que le **Tableau VI-4** montre les résultats de la mesure de la perte due à la polarisation (*PDL*) déduites des spectres de la réponse optique du guide canal central représentée dans la **Figure VI-8**.



**Figure VI-8 :** Réponse optique du canal central (numéro 8) à une source ( $1500\text{ nm}$ ) polarisée et non polarisée.

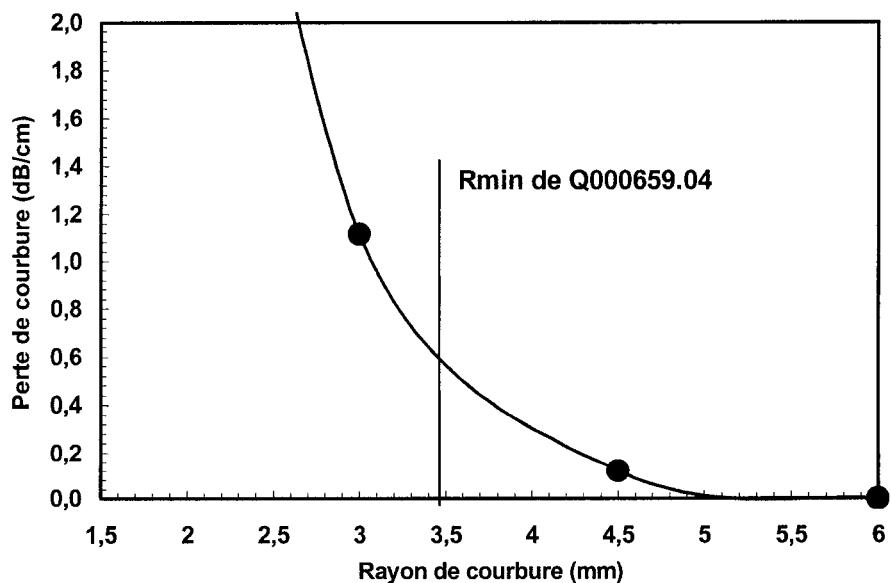
**Tableau VI-4 :** Résultants de la mesure de la *PDL* dans le guide canal central dont la réponse optique est montré dans la **Figure VI-8**.

DWDM-LR01-0133-Q000659.04						
$\lambda_{\text{centrale}}$ (nm)	PDL à $\lambda_{\text{centrale}}$	PDL à 1 dB à gauche de $\lambda_{\text{centrale}}$ (dB)	PDL à 1 dB à droite de $\lambda_{\text{centrale}}$ (dB)	Pic à gauche de $\lambda_{\text{centrale}}$ (nm)	Pic à droite de $\lambda_{\text{centrale}}$ (nm)	Décalage (nm)
1549.83	1.24	3.74	1.64	1.549.74	1.549.91	0.17

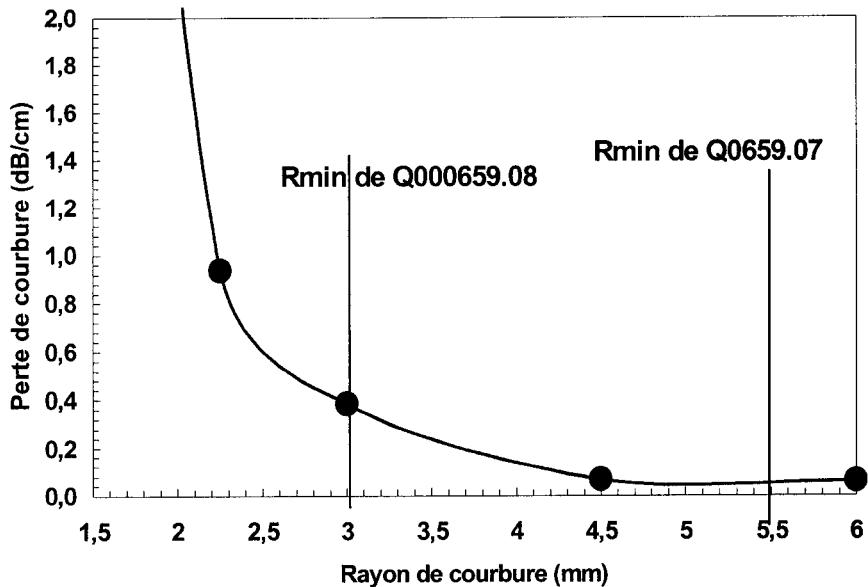
#### VI.3.4.1 Pertes d'insertions

L'analyse des résultats du **Tableau VI-5**, en terme de perte d'insertion montre que les *DWDM* de type A sont plus performants quand ils sont plus longs. Par contre, pour les *DWDM* de type B, les petits *DWDM* sont plus performants que les longs (grand) *DWDM*. Quand aux pertes de couplages, elles sont plus faibles d'environ 1 dB, dans les échantillons de type A que dans ceux de type B.

La **Figure VI-9** montre la perte due à la courbure en fonction du rayon de courbures et le rayon de courbure minimal des guides de *DWDM*. Pour le procédé A, les grands *DWDM* subissent des pertes de propagation élevées tandis que les petits *DWDM* présentent des pertes de courbure très élevées. La **Figure VI-10** montre la perte due à la courbure en fonction du rayon de courbures et le rayon de courbure minimal des guides de *DWDM* pour les échantillons de type B. Pour le procédé B, les grands *DWDM* ont des pertes de propagation élevées et les petits *DWDM* ont des pertes de courbures moins élevées.



**Figure VI-9** : Pertes dues à la courbure en fonction du rayon de courbure pour les échantillons de type A.



**Figure VI-10 :** Pertes dues à la courbure en fonction du rayon de courbure pour les échantillons de type B.

#### VI.3.4.2 Perte dépendante de la polarisation *PDL*

La valeur de la perte dépendante de la polarisation, *PDL*, mesurée au niveau de la largeur de bande de *1 dB* (*at 1 dB bandwidth*) pour les échantillons de type A et B, est entre *2.6* et *5.2 dB*. Le décalage (*The shift*) entre les deux pics est de *0.20* à *0.27 nm* et les pertes dues à la biréfringence sont de *0.5* à *0.8 dB*. Donc, si le décalage (*shift*) entre le deux pics est nul (la biréfringence est nulle), les pertes d'insertions seront améliorées de *0.5* à *0.8 dB*.

#### VI.3.4.3 Diaphonie (*Cross-Talk, XT*)

La moyenne de la diaphonie adjacente (*AXT*) pour les échantillons de type A est de *9.4 dB* pour les grands *DWDM* et elle est de *8.3 dB* pour les petits *DWDM*. Pour les échantillons de type B elle vaut *11.8 dB* pour les grands *DWDM* et *15.5 dB* pour les petits *DWDM*. La biréfringence contribue à la détérioration de la diaphonie adjacente (*AXT*) et les mesures de la diaphonie adjacente que nous avons données ont été faite sans supprimer la contribution de la biréfringence.

**Tableau VI-5 : Résumé des résultats des DWDM testés.**

Échantillons B(Q659)	142-7	142-8	141-7	141-8	143-7	143-8	139-8				
R <sub>min</sub> (mm)	5.5	3.0	5.5	3.0	5.5	3.0	3.0				
Path lenght (cm)	5.2	4.4	5.2	4.4	5.2	4.4	4.4				
PI(dB) Min.	9.26	8.06	8.34	7.85	9.32	8.15	9.27				
PI(dB) Max.	10.67	9.62	9.68	9.43	10.94	9.47	10.43				
uniformité (dB)	1.41	1.55	1.34	1.51	1.62	1.32	1.16				
Longueur du guide droit (cm)	3.5	3.0	3.5	3.0	3.5	3.0	3.0				
PI dans le guide droit (dB)	4.73	4.58	4.45	4.16	5.81	4.52					
PI dans le guide courbé (dB)	5.28	5.14	4.88	4.77	6.29	4.84					
Décalage entre deux Pol. (nm)	0.22	0.22	0.22	0.22	0.24	0.22					
XT Adjacent	14.3	17.4	9.0	11.9	12.0	17.3					
PDL-L	0.7	0.9	0.7	0.7	0.8	0.7					
PDL-R	0.5	0.6	0.6	0.6	0.6	0.5					
Échantillons A(Q659)	133-7	135-8	135-7	134-8	134-7	132-8	144-8	144-8	137-8	137-8	145-8
R <sub>min</sub> (mm)	7.5	7.5	3.5	7.5	3.5	7.5	7.5	3.5	7.5	3.5	7.5
Path lenght (cm)	6	6	4.5	6	4.5	6	6	4.5	6	4.5	6
PI(dB) Min.	8.89	8.40	10.56	8.44	11.64	8.15	8.05	8.20	8.59	7.62	7.55
PI(dB) Max.	10.75	10.06	12.47	10.02	13.47	9.89	9.69	10.71	10.62	9.21	9.39
Uniformité (dB)	1.86	1.66	1.91	1.58	1.83	1.74	1.64	1.50	2.03	1.59	1.84
Longueur du guide droit (cm)	3.7	3.7	3.0	3.7	3.0	3.7	3.7	3.0	3.7	3.0	3.0
PI dans le guide droit (dB)	4.56	4.25	5.61	4.43		4.13	4.18	3.79	4.44	3.56	
PI dans le guide courbé (dB)											
Décalage entre deux Pol. (nm)	0.23	0.222	0.21	0.17	0.22	0.27	0.27	0.24	0.19	0.27	0.26
XT Adjacent	7.1	7.8	9.5	10.8	8.1	12.4	8.1	6.7	10.2	9.0	
PDL-L	0.5	0.4	0.5	0.5	1.0	1.0	0.7	0.4	0.4	0.7	0.7
PDL-R	0.3	0.4	0.1	0.1	0.4	0.7	0.4	0.5	0.4	0.5	0.5

## VI.4 Discussion

### VI.4.1 Comparaison des procédés A et B

Si la conception des *DWDM* est optimisée de façon que les pertes de courbure seront nulles, les composants *DWDM* fabriqués, avec un tel design, selon le procédé A auront de meilleures performances en terme de perte d'insertion que ceux du procédé B. De plus, avec le procédé A les pertes de couplage sont plus faibles, d'environ  $1 \text{ dB}$ , comparativement au procédé B. Aussi, les pertes de propagation dans les échantillons A sont de  $1 \text{ dB}$  de moins par rapport aux échantillons B. Pour améliorer le design, une étude expérimentale sur les pertes de propagation en fonction de  $\Delta n$  est nécessaire.

### VI.4.2 Comment améliorer les performances des composants DWDM

Nous pensons que la longueur et le rayon de courbure des *DWDM* ont un impact important sur la performance optique de ces derniers. En optimisant ces deux paramètres, nous pouvons améliorer les performances des composants *DWDM*. Voici donc une analyse de cette situation: Pour le procédé B, la perte associée à la courbure ( $BL$ ) est nulle dans les grands *DWDM*, et si on réduit le rayon de courbure minimum de  $5.5 \text{ mm}$  à  $4 \text{ mm}$ , la longueur de *DWDM* se réduira d'environ  $0.6 \text{ cm}$ , en conséquence les pertes se réduiront d'environ  $0.5 \text{ dB}$ . mais pour les petits *DWDM*, les pertes de courbure commencent à se manifester, si on augmente la longueur en même temps que le rayon de courbure, les pertes de propagation augmenteront.

Mais en comparant la réduction des pertes de courbure est l'augmentation des pertes de propagation, l'amélioration en terme de perte totale dans le composant résultant n'est pas significative.

Pour le procédé A, les pertes de courbure dans les grands *DWDM* sont pratiquement nulles et on peut réduire le rayon minimum de la courbure de  $7.5$  à  $4.5 \text{ mm}$ , en conséquence, la longueur des *DWDM* se réduira de  $1.2 \text{ cm}$ , par conséquence les pertes

d'insertion seront améliorées d'environ  $0.8 \text{ dB}$ , la valeur de la perte d'insertion dans le canal central du *DWDM* deviendra  $6.8 \text{ dB}$ . De plus, si la biréfringence est pratiquement éliminée, la perte d'insertion sera amélioré de  $0.5 \text{ dB}$ , la perte d'insertion dans le canal central deviendra alors  $6.3 \text{ dB}$ .

Le **Tableau VI-6** montre la contribution des différents type de perte (courbure, couplage et propagation) dans les *DWDM* fabriqués selon le procédé A. les pertes dues à la biréfringence et à la microfabrication ne sont pas incluses. La marge de perte est quasiment nulle.

Les estimations des pertes totales coïncident avec l'objectif que nous nous sommes proposés d'atteindre. Pour fabriquer des composants *DWDM* avec les spécifications requises (en terme de perte) et avec une bonne marge, nous avons minimisé la contribution de certaines sources de perte.

Dans la situation de l'exemple qui suit, nous voyons que si le matériau est amélioré de telle façon que la perte de propagation passe de  $0.8 \text{ dB/cm}$  à  $0.6 \text{ dB/cm}$ , comme illustré dans le **Tableau VI-7**, la marge de perte sera d'environ  $1 \text{ dB}$ , qui est suffisante pour contenir les pertes dues à la microfabrication.

**Tableau VI-6 :** Contributions des différentes sources de perte dans un *DWDM* fabriqué avec le matériel green ( $0.8 \text{ dB/cm}$ ) et selon le procédé actuel.

<i>PP</i> (avec $0.8 \text{ dB/cm}$ )	<i>PC</i>	<i>BL</i>	<i>PD</i> (canaux extrêmes)	Total ( $\text{dB}$ )	Cible	Marge
3.8	1.0	0	2.2	7.0	7.0	0.0

**Tableau VI-7 :** Contribution des différentes sources de perte dans un *DWDM* fabriqué avec un matériel ayant  $0.6 \text{ dB/cm}$  comme perte de propagation

<i>PP</i> (with $0.6 \text{ dB/cm}$ )	<i>PC</i>	<i>BL</i>	<i>PD</i> (canaux extrêmes)	Total ( $\text{dB}$ )	Cible	Marge
2.9	1.0	0	2.2	6.1	7.0	0.9

## VI.5 Conclusion

D'après les résultats obtenus dans ce travail (composant mono-mode), nous pouvons tirer les conclusions principales suivantes:

- 1- Le procédé A ( $\Delta n = 0.01$ , dimension du guide est  $6x6$ ) est plus performant en terme de perte que le procédé B ( $\Delta n = 0.015$ , dimensions du guide  $5x5$ ).
- 2- Les composants mono-modes ont des avantages comparativement au composants multi-modes:
  - La diaphonie entre les canaux non adjacents est meilleure,
  - Une bonne planéité des pertes (perte vs. longueur d'onde) dans les guides canaux droits.
  - Faible perte de couplage.
  - La diaphonie entre canaux adjacents qu'on a mesurée est principalement due à la biréfringence et il est difficile de savoir si elle sera améliorée en adoptant la configuration mono-mode.
- 3- Le rayon de courbure de  $4.5 \text{ mm}$  est l'optimum pour obtenir des composants plus performants avec le matériau de  $0.8 \text{ dB/cm}$  comme perte de propagation et fabriqué selon le procédé A.

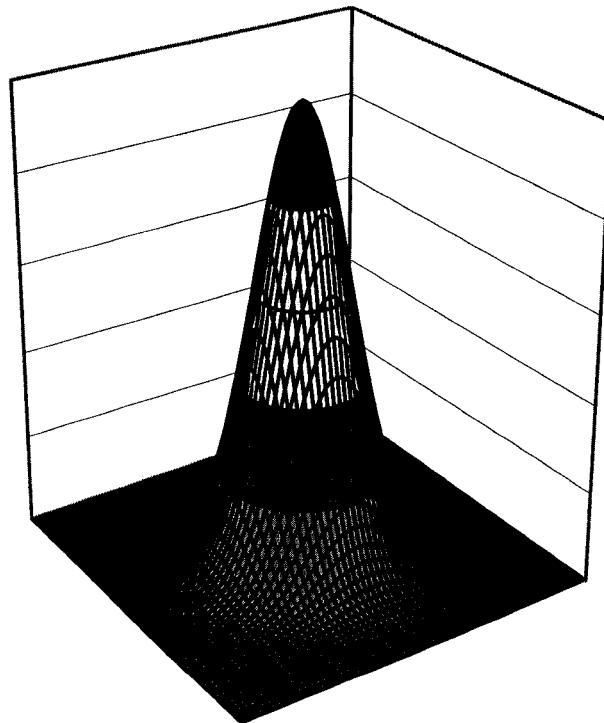
Nous pensons qu'il serait souhaitable de poursuivre la recherche dans le même sens.

Voici quelques suggestions:

- 1- Les mesures des pertes de courbure sont bien réussies, Il faut les refaire avec d'autres procédés, par exemple ( $\Delta n = 0.007$  qui donnera des pertes de couplage très faibles).
- 2- Utiliser la dimension de  $7x7$  pour le guide et avec un  $\Delta n$  de  $0.01$  pour diminuer les pertes de couplage.

## CHAPITRE VII. PERTE DE COUPLAGE ENTRE FIBRE MONO-MODE ET GUIDE D'ONDE RECTANGULAIRE

Ce chapitre a pour dessein de discuter les paramètres susceptibles d'affecter les pertes du couplage entre la fibre mono-mode (SMF) et le guide d'onde rectangulaire. Afin de réaliser cet objectif, nous avons effectué des simulations des effets des paramètres qui affectent les pertes de couplage, que nous expliquerons au long de ce chapitre. Quelques résultats expérimentaux obtenus à partir de ces travaux y seront présentés aussi.



**Figure VII-1 :** Profil de mode de la fibre mono-mode (SMF).

## VII.1 Résultats

Lors de l'alignement de la fibre avec le guide rectangulaire, une partie de la lumière se perd dans l'interface entre la fibre et le guide d'onde. Cette perte est appelée perte de couplage (PC). Plusieurs facteurs influencent la perte de couplage qui, dépendamment de la nature de ces facteurs, est séparée en deux types, intrinsèque et extrinsèque.

La perte de couplage est intrinsèque lorsqu'elle est affectée principalement par les deux facteurs suivants:

- a- le chevauchement du profil Mode,
- b- le nombre de modes dans le guide d'onde

En revanche, elle est extrinsèque si les facteurs qui l'affectent sont:

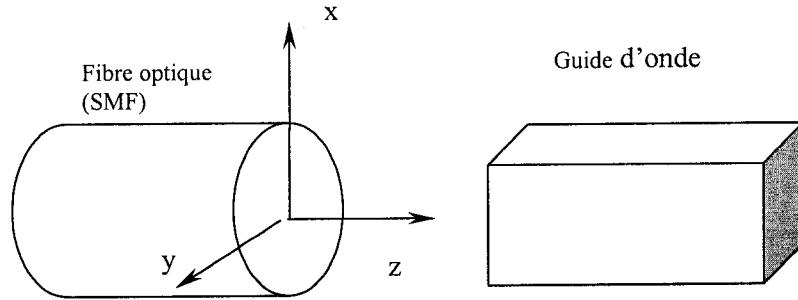
- a- le désalignement latéral et angulaire entre la fibre et le guide,
- b- la distance entre la fibre et le guide,
- c- la qualité des deux facettes du guide.

Dans ce chapitre, nous avons pris en considération tous les paramètres ci-dessus, hormis la qualité des facettes du guide.

## VII.2 Le chevauchement de profil des Modes.

### VII.2.1 Description

La lumière se propage sous forme de modes discrets dans un milieu guidant, qui peut être un guide d'onde rectangulaire ou une fibre optique. Chaque mode a un profil de champ qui dépend des coordonnées transversales du guide d'onde représentées par x et y dans la **Figure VII-2**, et que nous appelons profil de mode. Quand la lumière passe d'un guide à l'autre, ceci signifie qu'il y a eu un transfert de mode: la lumière est transférée du mode du premier guide au mode du deuxième guide. Le transfert est optimum lorsque les deux profils de mode des deux guides sont identiques. Par ailleurs, seulement une partie de l'énergie de la lumière sera transférée dans le deuxième guide et, dans ce cas, la perte de puissance due au couplage sera dominée par le chevauchement des profils de mode.



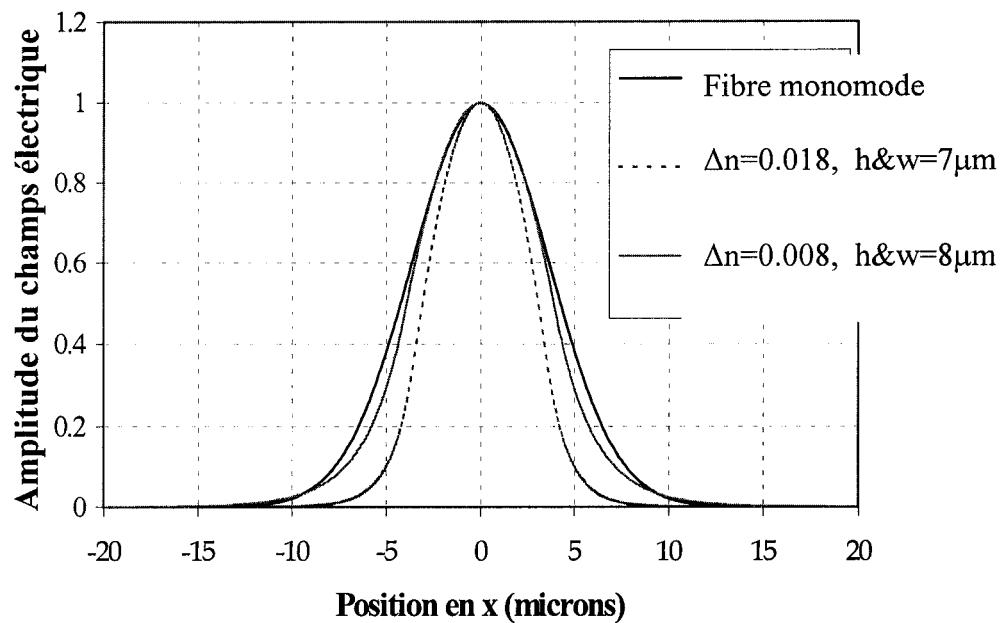
**Figure VII-2 :** Coordonnées utilisées dans ce chapitre.

En plus de sa dépendance à la dimension et à la forme du guide, exprimées par les coordonnées x et y, le profil de mode dépend aussi de la différence d'indice,  $\Delta n$ , entre le guide rectangulaire et la couche de revêtement ( couche tampon et la gaine). Cette dépendance apparaît clairement en observant les trois courbes de la **Figure VII-3** et qui représentent respectivement le profil du mode de la fibre standard mono- mode (SMF28) et le profil de mode fondamental pour deux guides d'onde rectangulaires. Les deux guides rectangulaires ont une section carrée dont l'épaisseur et la largeur sont toutes égales respectivement à  $7 \mu m$  et à  $8 \mu m$ . La différence d'indice  $\Delta n$  de la structure du premier guide est égale à  $0.016$ , alors que celle de la structure du deuxième guide vaut  $0.008$ . Le profil de mode dépend aussi bien de x que de y, mais nous avons à tracer les profils de mode uniquement pour  $y = 0$ . Nous remarquons aussi que le profil du mode de guide d'onde de la deuxième structure est plus proche de celui de la fibre.

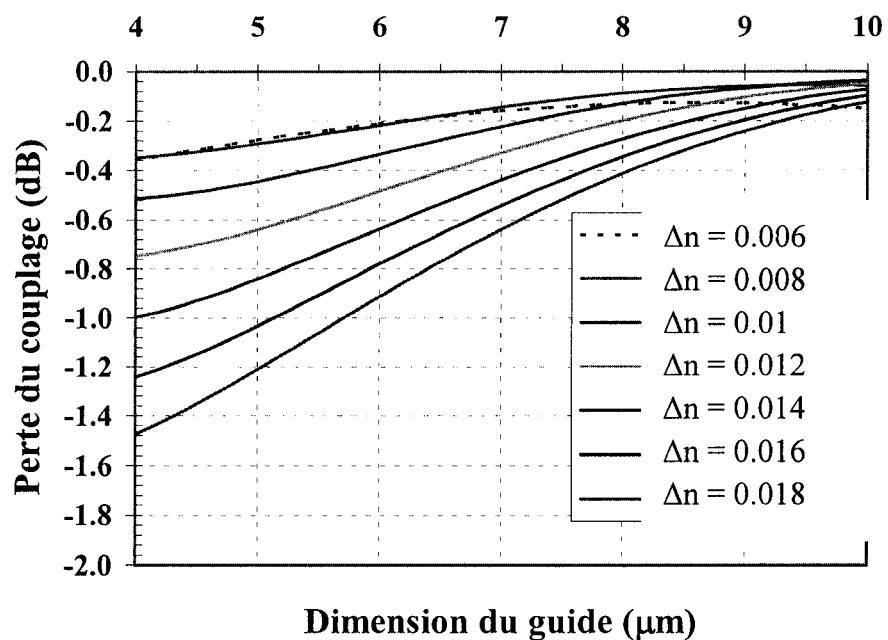
La perte de couplage due au chevauchement entre le profil de mode fondamental du guide d'onde et celui de la fibre mono-mode est donnée par:

$PL = 10 \log_{10}(T)$  où  $T$  est donnée par l'expression:

$$T = \frac{I_{transmise}}{I_{Incidente}} = \frac{\left| \int E_f(x,y) E_w(x,y) dx dy \right|^2}{\int E_f^2(x,y) dx dy \int E_w^2(x,y) dx dy} \quad \text{Eq. VII-1}$$



**Figure VII-3 :** La distribution du champ électrique de premier mode de la fibre et de guide rectangulaire.



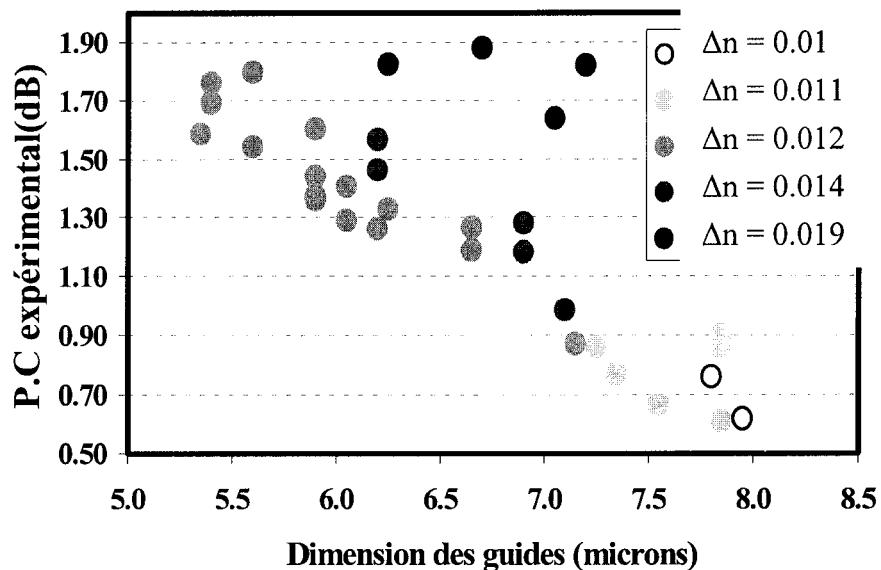
**Figure VII-4 :** Perte de couplage en fonction des dimensions du guide d'onde et pour différentes valeurs de  $\Delta n$ .

Où  $E_f(x,y)$  est le profil de mode de la fibre et  $E_w(x,y)$  est le profil de mode du guide.

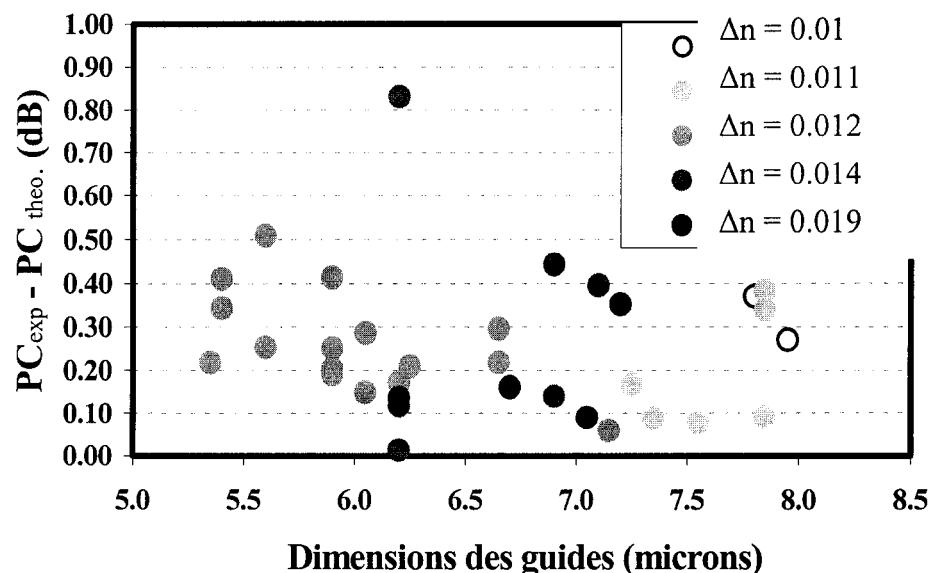
La **Figure VII-4** montre la perte de couplage due au chevauchement de profil des modes en fonction des dimensions transversales des guides et pour diverses différences d'indice  $\Delta n$ .

### VII.2.2 Les résultats expérimentaux

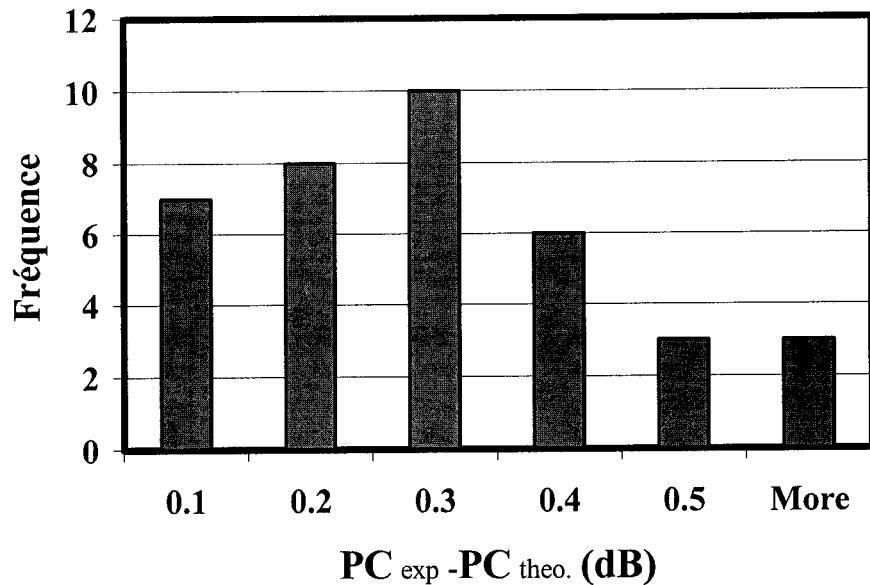
Nous avons mesuré les pertes de couplage en fonction des dimensions des guides et pour différentes valeurs de  $\Delta n$ . Notre dispositif expérimental était formé d'un guide aligné à une fibre mono-mode à l'entrée et à la sortie qui nous permettait de mesurer, en premier lieu les pertes d'insertions (PI) dans des guides très courts de 2 mm de longueur, puis, en sachant que la perte de propagation dans le matériel était de 0.8 dB/cm, nous pouvons déduire les pertes de couplage en soustrayant les pertes de propagation à la perte d'insertion mesurée dans les guides courts (2mm). Pour calculer la perte d'insertion, nous mesurons d'abord la puissance de la lumière qui a traversé le guide d'onde et les deux connecteurs de fibre, ensuite nous calculons la puissance de référence. Pour éliminer les pertes dues aux connecteurs, nous mesurons la référence de puissance fibre à fibre tout en alignant la fibre d'entrée avec celle de la sortie. Avec cette méthode, nous arrivons aussi à réduire les pertes dues à la qualité des facettes des deux fibres de l'entrée et de la sortie. Les résultats expérimentaux que nous avons relevé à la suite de notre travail, représentés à la **Figure VII-5**, montrent des pertes totales de couplage. Ces pertes totales de couplage correspondent à la somme de la perte de couplage à l'entrée et celle observée à la sortie, pour différentes valeurs de  $\Delta n$  et différentes dimensions du guide. Les résultats expérimentaux obtenus ne s'écartent que légèrement des valeurs théoriques de la perte de couplage, comme le montre la Figure VII-6. La moyenne des différences reste faible, de l'ordre de 0.25 dB comme illustrée dans l'histogramme de la **Figure VII-7**, et qui peut être attribuée au désalignement ou à la qualité des deux facettes de guide, ce qui nous permet de conclure que les résultats expérimentaux et théoriques sont en accord.



**Figure VII-5 :** Résultats expérimentaux de perte de couplage pour différents  $\Delta n$  et diverses dimensions du guides.



**Figure VII-6 :** Comparaison entre les valeurs de la perte de couplage expérimentale et théorique pour différents  $\Delta n$  et diverses dimensions.



**Figure VII-7 :** Histogramme de la différence entre les pertes de couplages mesurées expérimentalement et les résultats théoriques.

### VII.3 Nombre de modes dans un guide d'onde

Dans le cas où le guide d'onde est multi-mode et les modes d'ordre supérieurs sont excités, les pertes de couplage dépendent de la longueur d'onde. De plus, les modes ont différents indices de réfraction effectifs et par conséquent, ils se propagent avec différentes vitesses. À la sortie du guide, les modes ont différentes phases pour différentes longueurs d'ondes. Le couplage de ces derniers modes avec celui de la fibre mono-mode est maximal lorsque leurs phases sont égales ou déphasées d'un angle multiple de  $2\pi$ , d'où la dépendance en longueur d'onde des pertes de couplage. Pour décrire cet effet, considérons la situation où deux modes, 1 et 2 ayant des indices de réfraction effectifs  $n_{eff1}$  et  $n_{eff2}$  respectivement, sont excités dans un guide d'onde de longueur  $l$ . À la sortie du guide, le déphasage (phase shift) entre les deux modes est:

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} (n_{eff2} - n_{eff1}) l \quad \text{Eq.VII-2}$$

La perte de couplage s'obtient à partir de l'équation  $PC=10\cdot\log(T)$ , où  $T$  est donnée par la formule:

$$T = \frac{\left| \int E_f(x, y) (E_{w1}(x, y) + E_{w2}(x, y) e^{i\varphi}) dx dy \right|^2}{\int E_f^2(x, y) dx dy \int (E_{w1}^2(x, y) + E_{w2}^2(x, y)) dx dy} \quad \text{Eq.VII-3}$$

La fonction  $E_f(x, y)$  représente le profil de mode de la fibre, alors que  $E_{w1}(x, y)$  et  $E_{w2}(x, y)$  correspondent aux profils du premier et du deuxième mode du guide d'onde respectivement.

L'équation VI-3 peut être développée comme suit:

$$T = T_1 + T_2 + 2\sqrt{T_1 T_2} \cos(\varphi), \quad \text{Eq.VII-4}$$

où  $10\cdot\log T_1 \cdot (10\cdot\log T_2)$  est la perte de couplage entre le mode de la fibre et les deux modes du guide.

La perte de couplage, en plus de sa dépendance à la dimension du guide que nous avons expliquée dans la section précédente, dépend aussi de la longueur d'onde. La **Figure VII-8** montre la perte de couplage simulée pour différentes longueurs d'onde entre une fibre mono-mode et un guide d'onde à deux modes ayant les paramètres suivants:

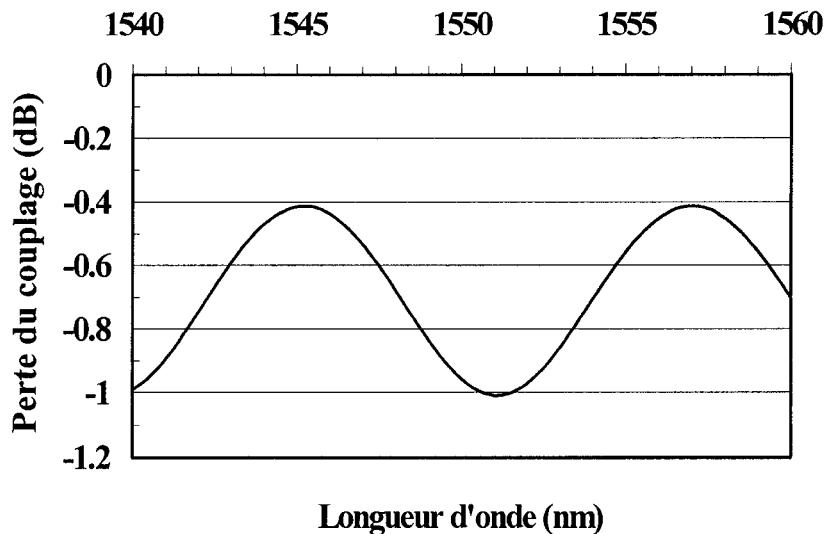
$n_{\text{eff1}} = 1.4632$  et  $n_{\text{eff2}} = 1.4564$ ,

$T_1 = 0.85$  (correspondant à  $-0.7\text{dB}$ ) et  $T_2 = 0.001$  (correspondant à  $-30\text{ dB}$ ),

$l = 30\text{ mm}$ .

Nous remarquons alors, d'après la dite figure, que même avec un faible couplage entre le mode de la fibre et le deuxième mode du guide, la perte de couplage totale est affectée et elle dépend donc de la longueur d'onde.

L'effet multi-mode peut affecter les mesures des pertes de propagation lorsqu'elles sont effectuées à l'aide de la méthode de "cutback" dans un guide d'onde droit à une longueur d'onde fixe. Aussi, en procédant par cette méthode, les mesures se font dans des portions d'un même guide mais ayant des longueurs différentes et, comme la perte de couplage pour une longueur d'onde fixe est différente pour chacune des longueurs du guide, il s'ensuit un manque de précision dans la mesure de la perte de propagation.



**Figure VII-8 :** Perte de couplage en fonction de la longueur d'onde entre la fibre (SMF) et les deux modes de guide d'onde.

Pour minimiser cet effet, nous avons adopté deux solutions dont la première consiste à utiliser plusieurs points (plus de quatre) lors de la prise des mesures avec la méthode *cutback* et qui, par conséquent, présente l'inconvénient d'être un procédé très long. La deuxième solution, quant à elle, consiste à mesurer la perte de couplage dans un intervalle de longueurs d'onde au lieu d'une longueur d'onde fixe. Les pertes de couplage sont alors moyennées dans l'intervalle de longueur d'onde, qui doit être suffisamment large pour contenir au moins une période, sans toutefois être très large, car les pertes de propagation dépendent de la longueur d'onde.

## VII.4 Désalignement latéral et angulaire

### VII.4.1 Désalignement latéral

Le désalignement latéral entre la fibre et le guide d'onde introduit un chevauchement additionnel entre le profil de mode de la fibre et celui du guide d'onde. Ce chevauchement apparaît dans l'équation même qui permet de calculer, la perte de couplage due au désalignement latéral d'une certaine amplitude  $s$  dans la direction  $x$ , qui est la suivante:  $PC(s)=10\cdot\log10(T(s))$ ,

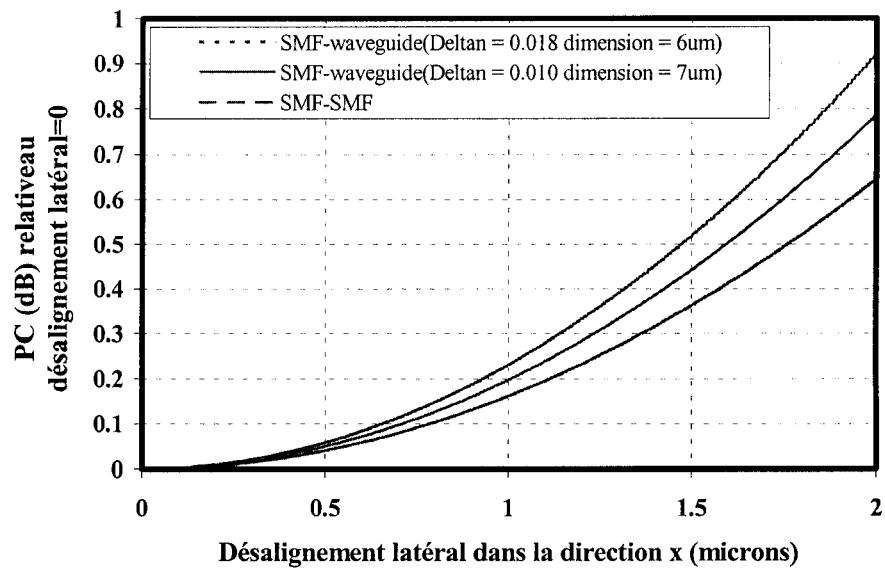
où  $T(s)$  est calculée comme suit:

$$T(s) = \frac{I_{transmise}}{I_{Incidente}} = \frac{\left| \int E_f(x-s, y) E_w(x, y) dx dy \right|^2}{\int E_f^2(x, y) dx dy \int E_w^2(x, y) dx dy} \quad \text{Eq.VII-5}$$

Dans la **Figure VII-9**, nous avons présenté la variation des pertes de couplage en fonction du désalignement latéral pour trois situations différentes:

- (1)- le couplage entre la fibre mono-mode et le guide d'onde avec une différence d'indice  $\Delta n$  de 0.018 et ayant  $6 \times 6 \mu\text{m}$  comme dimension,
- (2)- le couplage entre la fibre mono-mode et le guide d'onde avec une différence d'indice  $\Delta n$  de 0.01 et ayant  $7 \times 7 \mu\text{m}$  comme dimension
- (3)- le couplage entre deux fibres fibre mono-modes.

Nous remarquons une augmentation de perte de couplage avec le désalignement latéral quand le chevauchement des profils de mode de la fibre et celui du guide est élevé.



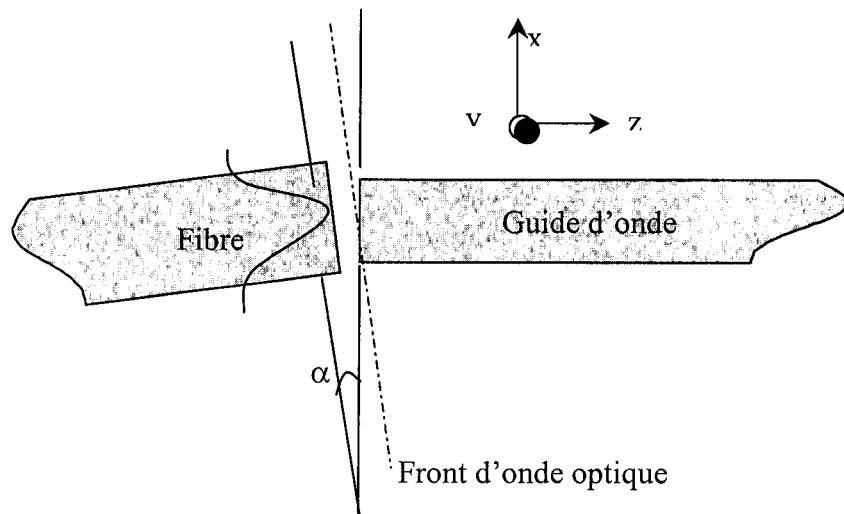
**Figure VII-9 :** Perte de couplage en fonction du désalignement latéral sur l'axe (x) dans une seule direction.

### VII.4.2 Désalignement angulaire

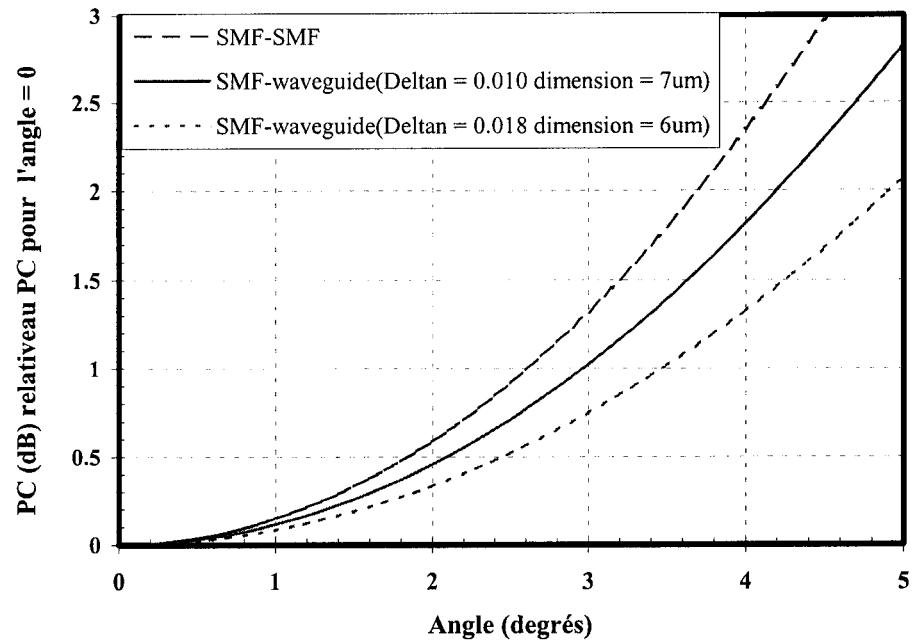
Nous désignons par le terme "désalignement angulaire" la situation où l'axe de propagation optique du guide d'onde et celui de la fibre forment un angle, comme illustré schématiquement dans la **Figure VII-10**. Dans une telle situation, le couplage entre le mode de la fibre et le mode fondamental du guide n'est pas optimal. En plus, quand le champ de front d'onde arrive à l'entrée du guide d'onde, la phase du champ électrique commence à dépendre de la variable  $x$ , et cette dépendance affecte le couplage avec le mode du guide d'onde. À l'entrée du guide d'onde, la phase du champ électrique est:

$$\varphi(x) = \frac{2\pi}{\lambda} (x + a) \sin \alpha, \quad \text{Eq.VII-6}$$

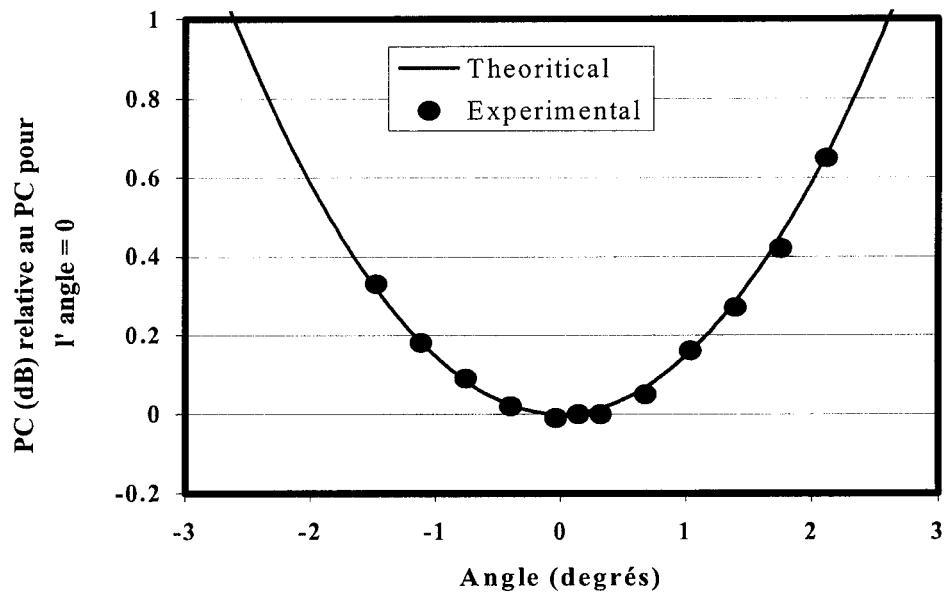
où  $a$  est le rayon du cœur de la fibre et  $\alpha$  est l'angle d'inclinaison de la fibre par rapport à l'axe du guide d'onde. L'origine de l'axe des  $x$  est le centre du cœur de la fibre.



**Figure VII-10 :** Angle entre l'axe de la fibre et l'axe du guide d'onde.



**Figure VII-11 :** Perte de couplage en fonction de désalignement angulaire de deux fibres (SMF).



**Figure VII-12 :** Résultats expérimentaux des pertes de couplage entre deux fibres monomodes en fonction du désalignement angulaire.

La perte de couplage entre le mode fondamental du guide d'onde et le mode de la fibre due au désalignement angulaire est calculée par la même formule que précédemment, c'est à dire:  $CL=10\cdot\log_{10}(T)$

où  $T$  est donnée par :

$$T = \frac{I_{transmitted}}{I_{Incident}} = \frac{\left| \int E_f(x, y) e^{i\phi(x)} E_w(x, y) dx dy \right|^2}{\int E_f^2(x, y) dx dy \int E_w^2(x, y) dx dy} \quad \text{Eq.VII-7}$$

La **Figure VII-11** montre la variation de perte de couplage en fonction du désalignement angulaire  $\alpha$ , les trois courbes de la figure représentent respectivement la perte observée lors du couplage entre une fibre mono-mode et un guide d'onde dans deux situations différentes où nous avons varié les paramètres correspondant à la variation d'indice  $\Delta n$  de 0.018 à 0.01 et à la dimension du guide, de  $6 \times 6 \mu\text{m}$  à  $7 \times 7 \mu\text{m}$ , et du couplage entre deux fibres mono-mode. La perte de couplage correspondant au désalignement angulaire  $\alpha = 0$  est prise comme référence. Les simulations montrent l'augmentation de la perte de couplage avec le désalignement angulaire  $\alpha$  quand le chevauchement entre les profils du mode de la fibre et celui du guide d'onde est faible.

Enfin, notons que les résultats expérimentaux de perte de couplage entre deux fibres mono-modes en fonction de l'angle de désalignement, présentés à la **Figure VII-12**, nous permettent de conclure qu'il y a une excellente concordance entre la théorie et les résultats expérimentaux.

## VII.5 Distance entre la fibre et le guide d'onde

La lumière diverge une fois qu'elle quitte la fibre. Si le guide est relativement éloigné de la fibre, une portion, seulement, de cette lumière entre dans le guide (voir la **Figure VII-13**). Nous calculerons la perte de couplage due à la divergence de la lumière quand elle passe de la fibre au guide, en supposant que le champ correspondant au mode de la mono-mode a une forme gaussienne de diamètre  $\omega_0=\omega_e=10.4\text{nm}$  à  $1550\text{ nm}$ . Le diamètre

du rayon optique, mesuré en fonction de la distance  $d$  parcourue par le faisceau depuis sa sortie de la fibre, est donné par la formule:

$$w = w_o \sqrt{1 + \left(\frac{d}{z_r}\right)^2} \quad \text{Eq.VII-8}$$

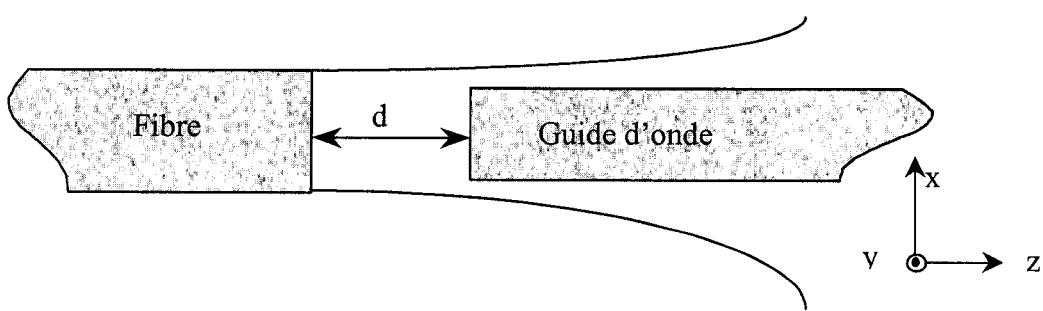
où  $w_o$  est le diamètre du faisceau à la sortie de la fibre et  $z_r = \pi w_o^2 / \lambda$ ,  $\lambda$  étant la longueur d'onde de la lumière.

À une distance  $d$  de la sortie de la fibre, la phase du champ électrique s'exprime en fonction des coordonnées  $x$  et  $y$  comme suit:

$$\varphi(x, y) = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{x^2 + y^2}{2R} . \quad \text{Eq.VII-9}$$

où  $R$  est le front d'onde du faisceau qui dépend de  $d$  de la manière suivante:

$$R = d \left( 1 + \frac{z_r^2}{d^2} \right) \quad \text{Eq.VII-10}$$



**Figure VII-13 :** Divergence du faisceau à la sortie de la fibre.

Nous obtenons la perte de couplage due au chevauchement du profil de mode fondamental du guide et le profil de mode de la fibre à l'aide de la formule  $CL=10\cdot\log_{10}(T)$ , où  $T$  correspond cette fois à:

$$T = \frac{I_{transmise}}{I_{incidente}} = \frac{\left| \int E_f(x, y) e^{i\phi(x, y)} E_w(x, y) dx dy \right|^2}{\int E_f^2(x, y) dx dy \int E_w^2(x, y) dx dy} \quad \text{Eq.VII-11}$$

La **Figure VII-14** montre la variation de la perte de couplage en fonction de la distance  $d$  pour trois situations différentes:

- 1- le couplage entre la fibre mono-mode (SMF) et le guide d'onde avec un  $\Delta n$  égale à 0.018 et ayant  $6 \times 6 \mu m$  comme dimension,
- 2- le couplage entre une fibre mono-mode et le guide d'onde avec un  $\Delta n$  égale à 0.01 et ayant  $7 \times 7 \mu m$  comme dimension,
- 3- le couplage entre deux fibres mono-modes.

La perte de couplage pour  $d = 0$  est prise comme référence.

En conclusion, nous constatons que la perte de couplage augmente avec la distance  $d$  quand le chevauchement entre le profil du mode de la fibre et celui du guide est élevé. La perte de couplage entre deux fibres augmente faiblement quand la distance entre les deux fibres augmente.

Des résultats expérimentaux de perte de couplage entre deux fibres en fonction de la distance  $d$  sont aussi représentés sur la même **Figure VII-14** par de petits carrés, montrant un bon accord entre les résultats théoriques et expérimentaux pour des distances inférieures à  $20 \mu m$ , alors que pour des distances supérieures à cette valeur, les résultats de la théorie s'écartent de ceux de l'expérience. Le désaccord entre les résultats théoriques et expérimentaux pour des valeurs assez grandes de  $d$  sera expliqué par l'effet de l'interférence dans une section ultérieure.

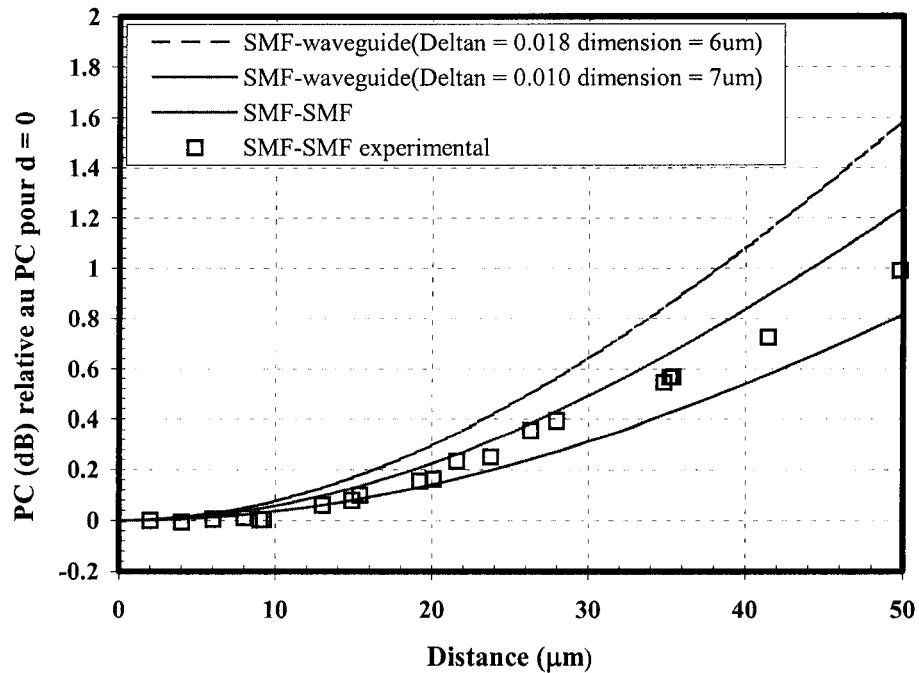


Figure VII-14 : Perte de couplage en fonction de la distance entre deux guides d'onde.

### VII.6 L'effet de réflexion de Fresnel

La réflexion de Fresnel se produit dans une interface qui sépare deux milieux ayant des indices de réfraction différents comme indiqué sur la **Figure VII-15**. Dans notre situation, cette réflexion résulte de la présence de l'air entre la fibre et le guide, et provoque ses effets sur la perte de couplage. Le coefficient de réflexion  $R$ , défini comme étant le rapport entre l'intensité de la lumière incidente et celle de la lumière réfléchie, est donné par :

$$R = \frac{I_{\text{refléchie}}}{I_{\text{Incidente}}} = \left( \frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1} \right)^2. \quad \text{Eq.VII-12}$$

Selon les conditions de notre expérimentation, le coefficient de réflexion  $R$  à l'interface de la fibre de silice dont l'indice de réfraction approximatif  $n_1$  de l'ordre de 1.468 et l'air dont l'indice de réfraction vaut approximativement 1, est de l'ordre de 3.6%. La

puissance perdue à cette interface est  $0.16 \text{ dB}$ . La **Figure VII-16** montre la puissance perdue due à la réflexion de Fresnel dans le cas de  $n_1 = 1.468$  et pour différentes valeurs de  $n_2$ .

Dans le cas de la structure guide d'onde-air-fibre - nous sommes en réalité en présence de deux régions de discontinuité de l'indice - la réflexion de Fresnel peut alors avoir lieu à l'interface fibre-air, et aussi à l'interface air-guide d'onde. La **Figure VII-17** montre schématiquement la réflexion de la lumière lorsque celle-ci traverse successivement trois milieux d'indices différents (fibre-air-guide). Dans ce cas, la réflexion de Fresnel totale est :

$$R = \frac{I_{\text{reflechie}}}{I_{\text{Incidente}}} \approx \frac{(n_3 - n_1)^2}{n_3 + n_1} + \frac{(n_2 - n_3)^2}{n_2 + n_3}. \quad \text{Eq.VII-13}$$

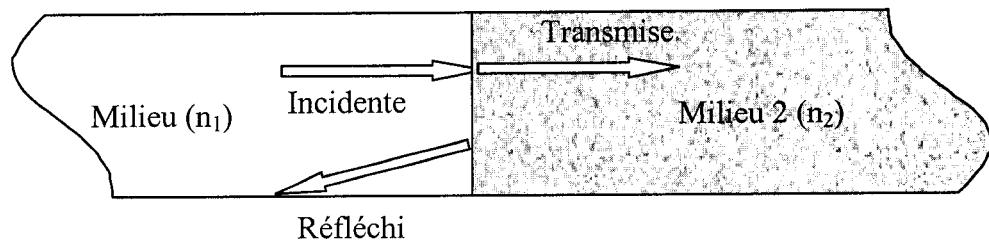
Nous citons maintenant un système de cette catégorie, que nous avons expérimenté avec une fibre d'indice  $n_1 = 1.468$  et un guide d'onde avec le même indice  $n_2 = n_1$  séparé par de l'air comme milieu intermédiaire d'indice  $n_3 = 1$ . La perte totale de puissance observée pour ce système est relativement importante, elle est de l'ordre de  $0.32 \text{ dB}$ .

Pour minimiser les pertes dues à la réflexion de Fresnel, le milieu intermédiaire (milieu d'indice  $n_3$ ) doit être choisi de telle sorte que son indice de réfraction minimise l'expression *Eq.VI-13*. La valeur optimum de  $n_3$  sera donc une solution de  $dR/dn_3 = 0$ . En dérivant l'équation *VI-13*, nous obtenons l'équation suivante:

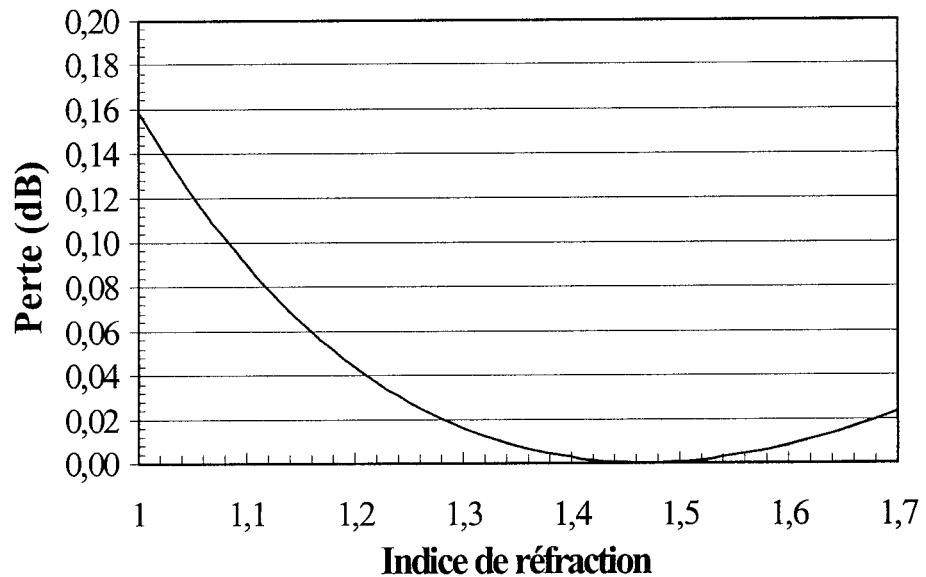
$$\frac{n_1(n_3 - n_1)}{(n_3 + n_1)^3} + \frac{n_2(n_3 - n_2)}{(n_3 + n_2)^3} = 0. \quad \text{Eq.VII-14}$$

En choisissant les trois indices de manière que  $n_1 \sim n_2 \sim n_3$ , nous aurons;  $(n_3 + n_2) \gg (n_3 - n_2)$  et  $(n_3 + n_1) \gg (n_3 - n_1)$ , sous ces conditions, une valeur convenable de  $n_3$  sera :

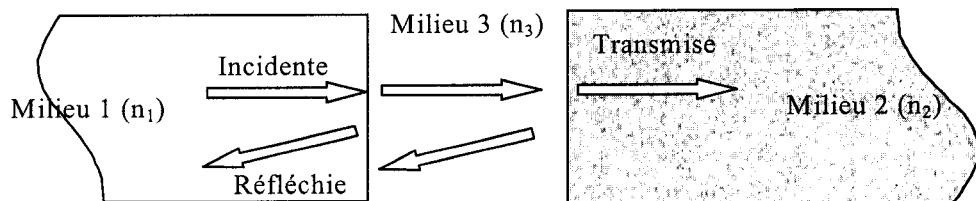
$$n_3(\text{optimum}) = \frac{n_1 + n_2}{2} \quad \text{Eq.VII-15}$$



**Figure VII-15 :** Réflexion de Fresnel à l'interface de deux milieux différents.



**Figure VII-16 :** Perte due à la réflexion de Fresnel Pour  $n_1 = 1.468$



**Figure VII-17 :** La réflexion de Fresnel dans les différentes interfaces.

### VII.7 Effet d'interférence.

Dans la configuration fibre-air-guide d'onde, où le guide et la fibre sont très proches l'un de l'autre, le phénomène d'interférence peut avoir lieu. La puissance transmise de la fibre au guide d'onde, et vice-versa peut être très différente de ce qui est prévu par l'équation VI-13.

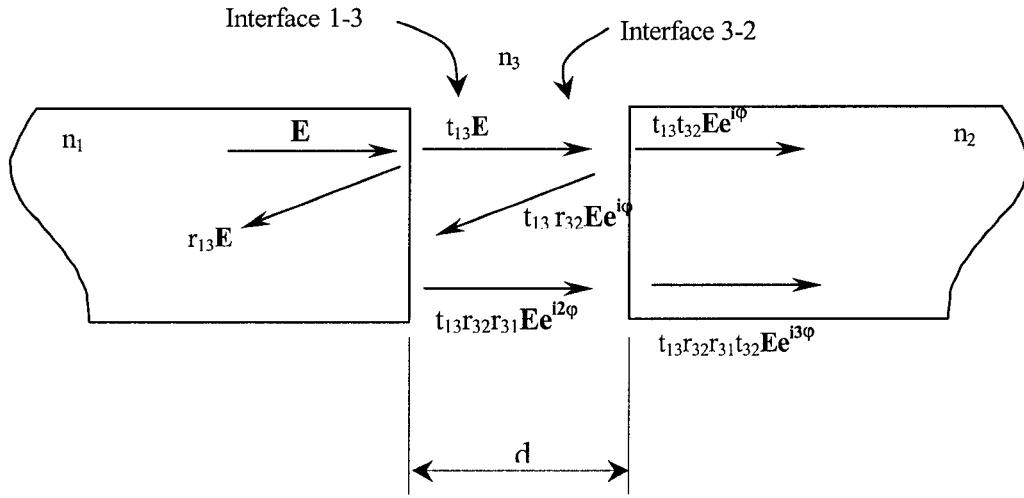
Pour tenir compte de l'effet de l'interférence dans le calcul du coefficient de transmission, nous utilisons l'expression du champ électrique. Dans la **Figure VII-18**, nous avons schématisé la réflexion de Fresnel au niveau des différentes interfaces en indiquant les transformations subies par le champ électrique aux interfaces et après chaque réflexion de Fresnel. Le champ réfléchi (vers l'interface 1-3) par l'interface 3-2 est à nouveau réfléchi (vers l'interface 3-2), puis transmis vers le milieu 2. Ces réflexions peuvent se répéter plusieurs fois, mais seule la première réflexion est prise en considération parce que les coefficients de réflexion sont très faibles. Le champ total transmis dans le milieu 2 est la somme des deux champs représentés dans la **Figure VII-18**, il est donné par l'équation qui suit :

$$E_t = (1 + r_{32}r_{31}e^{i2\phi})t_{13}t_{32}Ee^{i\phi}, \quad \text{Eq.VII-16}$$

où les coefficients de réflexion et de transmission sont donnés par :

$$r_{ij} = \frac{n_i - n_j}{n_i + n_j}, \quad \text{Eq.VII-17}$$

$$t_{ij} = \frac{2n_i}{n_i + n_j}, \quad \text{Eq.VII-18}$$



**Figure VII-18 :** Réflexion de Fresnel à différentes interfaces séparant différents milieux.

et la phase  $\phi$  est donnée par:

$$\phi = \frac{2\pi}{\lambda} n_3 d, \quad \text{Eq.VII-19}$$

où  $d$  est la distance séparant le milieu 1 et le milieu 3, et  $\lambda$  est la longueur d'onde.

Le coefficient de transmission d'intensité est calculé par la formule suivante :

$$T = \frac{n_1}{n_2} \left| \frac{E_t}{E} \right|^2 \quad \text{Eq.VII-20}$$

En Utilisant l'équation VI-16, on obtient l'équation qui suit :

$$T = \frac{4n_2 n_3}{(n_1 + n_3)(n_2 + n_3)} \left| 1 + \frac{(n_1 + n_3)^2 (n_2 + n_3)^2}{(n_1 + n_3)^2 (n_2 + n_3)^2} + 2 \frac{(n_1 + n_3)(n_2 + n_3)}{(n_1 + n_3)(n_2 + n_3)} \cos\left(\frac{4\pi}{\lambda} n_3 d\right) \right|^2. \quad \text{Eq.VII-21}$$

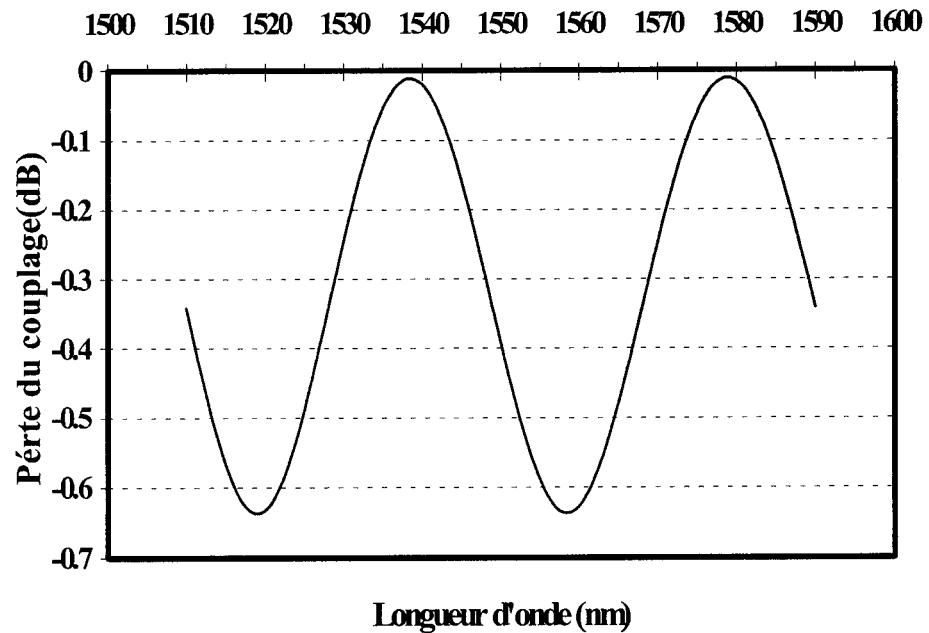
La présence de  $\lambda$  dans l'expression de  $T$  confirme que la transmission dépend de la longueur d'onde. La **Figure VII-19** montre la puissance perdue lors du couplage et la

fonction  $T$  est exprimée à l'aide de la longueur d'onde  $\lambda$ , en utilisant la relation qui apparaît dans l'équation VI-21 avec  $n_1 = 1.468$ ,  $n_2 = 1.468$ ,  $n_3 = 1$  et  $d = 30 \mu m$ . Le couplage est périodique avec une planéité d'environ  $0.6 dB$ . La période de perte de couplage dépend elle aussi de  $d$  et de la longueur d'onde  $\lambda$ . À partir de l'équation VI-21, elle est calculée comme suit :

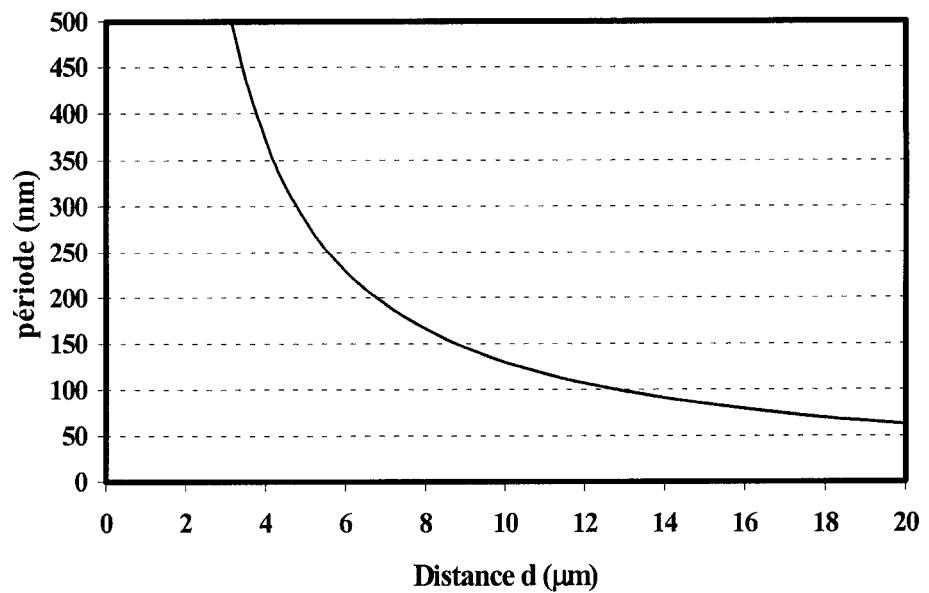
$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{2d - \lambda} \quad \text{Eq.VII-22}$$

Dans la **Figure VII-20**, nous avons tracé la courbe représentative de la période  $\Delta\lambda$  de la perte de couplage en fonction de la distance  $d$ . Quand la fibre est très proche du guide, la période est très grande et l'effet d'interférence ne peut être observé dans un petit intervalle de longueurs d'onde.

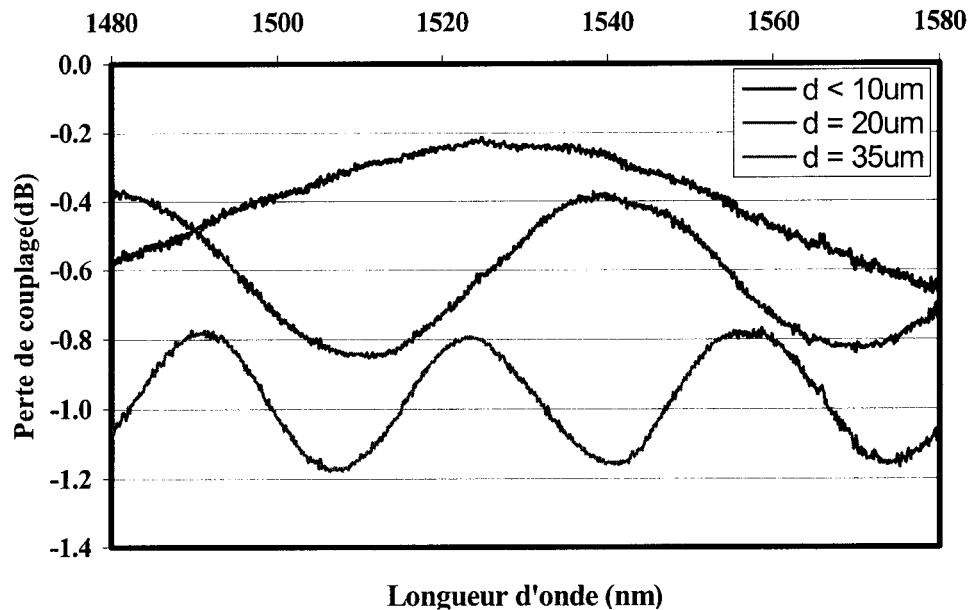
La **Figure VII-21** montre les résultats expérimentaux des pertes de couplage entre deux fibres mono-modes pour trois distances différentes séparant les deux fibres;  $d = 35 \mu m$ ,  $d = 20 \mu m$ , et  $d < 10 \mu m$ . Pour  $d = 20 \mu m$ , les résultats expérimentaux sont en accord avec les prédictions théoriques. La planéité des pertes est d'environ  $0.5 dB$  et  $0.4 dB$  pour  $d = 20$  et  $35 \mu m$  respectivement. Ces valeurs sont légèrement inférieures à la valeur théorique de  $0.6 dB$ . Cette différence est expliquée par le fait que dans la formulation de l'expression VI-21, nous avons supposé que la lumière réfléchie vers l'arrière à l'interface 3-2 voyage d'une interface à l'autre et entre dans le guide d'onde 2 sans subir aucune perte due à l'effet de divergence du faisceau décrit dans la section VI.6.1. En fait, à cause des nombreux "va-et-vient" de la lumière entre les différentes interfaces, nous n'avons pas seulement tenu compte d'une partie de cette lumière collectée par le guide d'onde 2. De plus, la proportion de lumière perdue est d'autant plus élevée que les deux guides s'éloignent l'un de l'autre. Cet effet explique également le léger désaccord entre les résultats expérimentaux et théoriques de la perte de couplage pour les distances supérieures à  $20 \mu m$ .



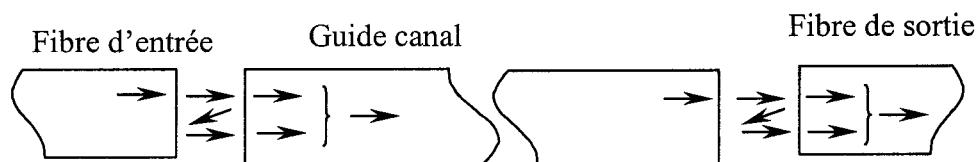
**Figure VII-19 :** Perte de couplage en fonction de la longueur d'onde.



**Figure VII-20 :** Période de perte de couplage en fonction de la distance entre la fibre et le guide



**Figure VII-21 :** Perte de couplage entre deux fibres mono-mode SMF en fonction de la longueur d'onde pour différentes distances séparant les fibres.



**Figure VII-22 :** Les différentes réflexions dans la configuration fibre-guide d'onde-fibre.

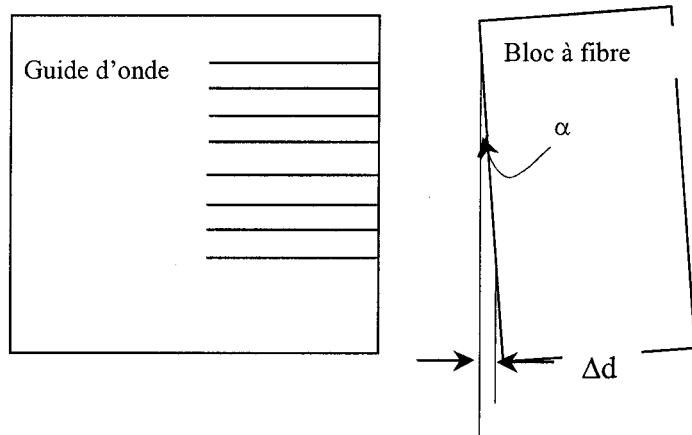
Considérons la perte de couplage entre le guide d'ondes et la fibre mono-mode à l'entrée et à la sortie de ce dernier. Le schéma de la Figure VII-22 montre les différentes réflexions qui peuvent se produire. Aussi, la première interférence se produit à l'entrée, quand la lumière va de la fibre au guide d'onde. Par ailleurs, le spectre de perte de couplage à l'entrée a la même forme représentée sur le schéma de la Figure VII-22. Quand la lumière va du guide d'ondes à la fibre de sortie, se produit aussi le phénomène d'interférence et par conséquent le spectre de perte de couplage sera identique à celui du schéma de la **Figure VII-22**. Le spectre de perte de couplage totale est la superposition

des 2 spectres (entrée/sortie) qui peuvent avoir différentes périodes si la distance entre la fibre et le guide d'ondes est différente à l'entrée et à la sortie.

## VII.8 Effet des pertes de couplage dans les mesures optiques des DWDM.

### VII.8.1 L'alignement avec une fibre.

En alignant la fibre de sortie séparément avec chaque canal de sortie de DWDM, la distance entre le guide d'ondes et la fibre est optimisée pour chacun des canaux de DWDM et donc la perte de couplage est minimisée pour chacun des canaux de sortie. Si les facettes de guide d'ondes et de fibre sont d'une bonne qualité et si la distance entre le guide d'ondes et la fibre est petite, les effets d'interférences peuvent compenser la perte due à la réflexion de Fresnel. L'utilisation d'un milieu d'indice adapté aux deux milieux (guide et fibre) entre la fibre et le guide n'est pas nécessaire.



**Figure VII-23 :** L'angle entre le guide d'onde et la facette de bloc à fibre

### VII.8.2 Alignement avec un bloc de fibre

En alignant les canaux de sortie de *DWDM*, simultanément avec le bloc de fibre, la perte de couplage est optimisée uniquement pour un canal parmi les canaux et ne peut l'être pour les autres. Les raisons de cette difficulté d'optimiser la perte de couplage sont

multiples: d'abord, si la distance entre la fibre et le guide d'ondes n'est pas très petite, la perte de couplage qui dépend de la longueur d'onde ne peut pas être optimisée pour plusieurs longueurs d'onde à la fois. Ensuite, la perte de couplage, étant dépendante de la distance entre la fibre et le guide, sera affectée lors de l'alignement du bloc à fibres avec la sortie du dispositif *DWDM*, introduite par la présence d'un petit angle entre les facettes qui se crée lors de l'alignement du bloc à fibres avec les canaux de sorties de *DWDM*.

Nous avons déjà vu que la perte de couplage en fonction de la distance était périodique et sa période s'obtient à partir de l'équation VI-21 :

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda}{2n_3} \quad \text{Eq. VII-23}$$

Lorsque l'espace entre les guides d'ondes et le bloc de fibres est occupé par de l'air, la période  $\Delta\lambda$  est égale à la moitié de la longueur d'onde, pour  $\lambda = 1.55 \mu m$ ,  $\Delta\lambda$  est  $0.78 \mu m$ .

Sur le schéma de la **Figure VII-23**, nous illustrons une situation où il y a un angle  $\alpha$  entre les guides d'ondes et les facettes du bloc de fibre. Cet angle induit une différence  $\Delta d$  entre la distance séparant le premier canal de DWDM et la première fibre du bloc et la distance séparant le dernier canal de DWDM et la dernière fibre du bloc. Pour un dispositif DWDM de 8 canaux avec  $250 \mu m$  d'écart entre deux canaux adjacents, l'angle  $\alpha$  qui correspond à  $\Delta d = 0.78 \mu m$  ne vaut que  $0.025$  degrés. L'alignement ne peut pas être optimisé pour obtenir un si petit angle. Dans ce cas, l'utilisation d'un milieu d'indice adapté aux deux milieux (guide et fibre) entre le bloc à fibres et les canaux de sortie de DWDM est nécessaire.

## CONCLUSION

Dans ce document, après avoir exposé d'une façon générale les bases et les avantages du génie moléculaire du sol-gel et polymères, nous avons synthétisé chimiquement des sol-gels hybrides organiques-inorganiques et des polymères destinés au domaine d'application de l'optique intégrée. En effet, durant les travaux de recherches qui ont conduit à la rédaction des trois premiers chapitres de ce document, nous avons réussi à synthétiser chimiquement et d'une façon reproductible trois types de sol-gel organiques-inorganiques (sol-gel à Zirconium, sol-gel à aluminium et sol-gel Aluminophosphate) et trois types de matériaux polymères (*BG*, *FG* et *SFG*). Nous avons choisi ces matériaux sol-gel et polymères, étant donnée leur transparence optique, respectivement dans les fenêtres de télécommunications  $1.3 \mu m$  et  $1.5 \mu m$ . Cette transparence dépend de la micro-hétérogénéité dans les matériaux et doit être beaucoup plus petite que la longueur d'onde optique. Ces matrices transparentes peuvent être obtenues avec des particules très petites (particules colloïdales) ou des espèces polymériques interpénétrantes de petites dimensions. Dans les deux cas, la croissance des particules d'oxyde doit être contrôlée par la catalyse acide-base ou par modification chimique.

Nous avons mesuré la transparence à travers la mesure des pertes de propagation dans des guides d'ondes plans par la méthode du prisme coupleur et dans des guides d'ondes canaux par la méthode de *cut-back*. Les mesures de *cut-back* ont révélé des pertes de propagations inférieures à  $1 \text{ dB/cm}$  dans la fenêtre optique de  $1.3 \mu m$  pour les matériaux sol-gel de l'ordre de  $0.65 \text{ dB/cm}$  dans la fenêtre optique et de  $1.5 \mu m$  pour les matériaux polymères (*SFG*).

De plus, nous avons atteint un haut niveau de reproductibilité et de contrôle des propriétés chimiques tels que la viscosité, le poids moléculaire, la solubilité, la

polydispersité, la transition vitreuse et les propriétés optiques qui sont la transparence et l'indice de réfraction au niveau des solutions et des couches minces. D'autre part, nous avons contrôlé et reproduit la qualité et les propriétés optiques des films tirés en terme d'étalement de la solution sur le substrat ainsi qu'en termes d'uniformité d'épaisseur des couches minces ( $< 2 \%$ ) et d'uniformité d'indice de réfraction ( $< 0.03 \%$ ). Aussi, nous avons pu reproduire les pertes de propagation d'une façon continue, d'où le grand potentiel d'application du sol-gel et polymères dans le domaine d'optique intégrée.

Dans l'un des volets principaux de ce document, nous nous sommes intéressés à la caractérisation optique des couches minces à base du sol-gel et de polymère, ainsi qu'aux propriétés thermo-optiques et à la biréfringence des matériaux sol-gel et polymères utilisés dans la micro-fabrication des composants optiques *DWDM*.

Nous avons réussi à éliminer la biréfringence dans les films minces à base de sol-gel Aluminophosphate et Zirconium d'une manière simple et efficace, et ce, en combinant l'effet des traitements thermiques et ceux de la lumière UV. En effet, par l'ajustement du traitement de la pré-cuisson et le temps d'exposition à l'UV, nous avons fabriqué des films minces sol-gel non biréfringents. Cette propriété de non biréfringence permet la réalisation de dispositifs indépendants de la polarisation. Le coefficient d'expansion est directement déduit des mesures de la variation d'indice de réfraction en fonction de la température ( $dn/dT$ ). Cette variation est de l'ordre de  $-2 \cdot 10^{-4}/^{\circ}C$  pour la polarisation *TE* et *TM*. Ainsi, nous n'avons observé aucun changement de phase, ce qui signifie que l'indice de réfraction dépend seulement de la densité du matériel.

Nous avons aussi montré que la biréfringence et les phénomènes dépendants de la température sont évidents mais leurs effets sont complexes sur les performances optiques d'un composant optique *DWDM*. Notons que, par exemple, la construction d'une structure sandwich avec des matériaux non biréfringents peut engendrer des composants biréfringents. Inversement, les composants optiques issus de matériaux biréfringents

peuvent être insensibles à la biréfringence. D'où la nécessité d'un compromis entre le choix de matériaux et l'optimisation de procédés de micro-fabrication pour la réalisation des composants optiques non biréfringents.

Nous avons réalisé une étude approfondie des propriétés thermo-optiques des matériaux sol-gel et polymères. Au cours de cette étude, nous avons montré que la dépendance à la température de la longueur d'onde de chaque canal dans la réponse optique d'un composant *DWDM* est minimisée par l'ajustement du coefficient d'expansion thermique du substrat ( $\alpha_{sub}$ ). De plus, nous avons réalisé un composant *DWDM*, à la fois *athermal* et dont la réponse optique est indépendante de la polarisation.

L'analyse des résultats de la caractérisation thermo-optique nous a conduit à la conception, la micro-fabrication et la caractérisation des composants *DWDM tout polymère*, dits intelligents, dont la réponse optique est indépendante de la température. Les *DWDM 8x8 100 GHz, tout polymères*, que nous avons fabriqué et caractérisé montrent une grande stabilité de la réponse optique dans un large intervalle de température variant de 25 °C à 70 °C. En effet, le décalage en longueur d'onde  $\Delta\lambda$  entre 25 °C et 70 °C est de l'ordre de 0.2 nm. Ils montrent aussi, une diaphonie inférieure à -25 dB pour une largeur de bande de -1 dB et une perte d'insertion inférieure à -6 dB pour la plupart des canaux.

Nous avons, ensuite, conçu et fabriqué des composants optiques Corse *DWDM 1x4 400 GHz à 1.3 μm tout polymères* qui montrent une insensibilité quasiment parfaite à la température. De plus, ils présentent de bonnes performances optiques telles qu'une diaphonie < -25 dB pour une largeur de bande de -3 dB et une perte d'insertion inférieure à -4.5 dB pour tous les canaux.

Nous avons développé différents procédés photo-lithographiques, convenant aux caractéristiques de chaque matériau étudié, spécialement le matériau sol-gel à zirconium et le ter-polymère *SFG* et avons optimisé les différents procédés thermiques avec les

traitements à la lumière UV. Ainsi, nous avons obtenu de bonnes résolutions photolithographiques, des guides d'ondes avec des formes rectangulaires quasi-parfaites ainsi que des parois très lisses dont la rugosité est inférieure à  $10 \text{ nm}$ . De plus, nous avons réussi à graver en profondeur (aspect ratio  $AR$  élevé), à l'aide d'un procédé de gravure chimique humide que nous avons optimisé, la région non exposée au traitement UV entre deux guides adjacents séparés d'une distance de  $5 \mu\text{m}$ .

D'après les résultats de l'étude de la gravure chimique humide, nous suggérons tout d'abord d'utiliser un co-solvant - mélange de pentanedione / butyle éther (10/90) - pour l'étape de développement car cette proportion réduit l'expansion du matériau polymérisé. Une étude sera nécessaire pour déterminer la vitesse de gravure dans les régions non-polymérisées (non-exposées par les rayons UV) et dans la couche tampon. De plus, une autre étude sera essentielle afin de déterminer si les structures sont bien développées et par là-même de connaître la résolution maximale que nous pouvons obtenir avec ce mélange de solvant. Finalement, une étude sera peut-être nécessaire pour évaluer l'utilité d'un rinçage avec un autre mélange pentanedione / butyle éther et/ou un non-solvant plus volatile tel que l'éther.

Nous avons, d'après les résultats d'une série d'expériences réalisées séparément avec trois différents lots de matériaux, confirmé l'avantage du matériau gaine *FG* sur le matériau gaine *BG*. En effet, en utilisant *FG* comme gaine au lieu de la gaine *BG*, la perte d'insertion a été réduite de  $0.76 \text{ dB}$  et  $0.62 \text{ dB}$  respectivement dans les composants *DWDM 1X8 100 GHz* et *200 GHz*, tandis que le décalage (shift) *TE/TM* a été réduit de  $0.3$  à  $0.1 \text{ nm}$ . Aussi, la largeur de bande du spectre de la réponse optique des canaux de sortie d'un *DWDM* à  $20 \text{ dB}$  ( $20 \text{ dB}$  depuis le sommet de pic vers le bas) a été réduite de  $9 \%$  et la diaphonie adjacente a été améliorée de  $5 \text{ dB}$ .

Toujours dans le souci d'améliorer les performances optiques des composants DWDM, nous avons conçu, fabriqué et caractérisé des composants DWDM mono-modes. Nous avons montré, d'une part, que le procédé A ( $\Delta n = 0.01$ , dimension du guide est  $6x6$ ) est plus performant en terme de perte d'insertion que le procédé B ( $\Delta n = 0.015$ , dimensions

du guide  $5x5$ ). D'autre part, comparativement aux composants multi-modes, les composants mono-modes ont des avantages. En effet, ils présentent une meilleure diaphonie entre les canaux non adjacents et une bonne planéité des pertes d'insertions (perte en fonction de la longueur d'onde) ainsi qu'une faible perte de couplage. Cependant, la diaphonie entre les canaux adjacents que nous avons mesurée est principalement due à la biréfringence et il est difficile de savoir si elle est améliorée en adoptant la configuration mono-mode. De plus, nous avons montré, suite à l'analyse des résultats optiques des *DWDM* fabriqués selon le procédé A et avec un matériau de  $0.8 \text{ dB/cm}$  de perte de propagation, que le rayon de courbure de  $4.5 \text{ mm}$  est l'optimum pour obtenir des composants *DWDM* plus performants.

Suite à l'étude des composants mono-modes, nous proposons de refaire l'étude des pertes de courbures en fonction d'autres procédés, par exemple pour un  $\Delta n$  égal à  $0.007$  qui donnera des pertes de couplages très faibles et/ou utiliser la dimension de  $7x7$  pour le guide avec un  $\Delta n$  de  $0.01$  afin de diminuer les pertes de couplage.

Nous avons effectué une étude théorique et expérimentale de la perte de couplage entre fibre mono-mode et un guide d'onde rectangulaire. Aussi, nous avons montré que la perte de couplage est fonction de plusieurs paramètres tels que l'indice de réfraction de guide, le degré de chevauchement de mode de la fibre et du guide, la distance entre la fibre et le guide ainsi que l'indice de réfraction du milieu intermédiaire entre le guide et la fibre. Cette étude de la perte de couplage entre la fibre et le guide d'onde montre, au niveau technique, qu'elle est difficilement contrôlable et reproductible surtout lorsqu'il s'agit d'aligner et de connecter un bloc de fibre au guide de sortie d'un *DWDM*.

Afin d'atteindre, en fabriquant des composants optiques à la base de sol-gel et de polymère, le niveau commercial et de s'imposer sur le marché des télécommunications, il est indispensable d'améliorer les performances des matériaux en terme de perte de propagation ( $< 0.4 \text{ dB/cm}$ ). Il est aussi nécessaire de développer de nouvelles techniques de micro-fabrication et, plus particulièrement, l'amélioration de la résolution de la

photolithographie ainsi que la technique de gravure. Celle-ci engendre l'augmentation de l'*aspect ratio (AR)* qui permet le nettoyage en profondeur efficace de la région entre deux guides adjacents séparés par une distance inférieure à 2  $\mu\text{m}$ . Cette amélioration de la gravure chimique va permettre de diminuer les pertes dues à la conception (*design loss*) en plus d'améliorer la diaphonie.

D'autres efforts, d'ordre technique, tel que le bon choix de matériau adhésif constituant le milieu intermédiaire situé entre la facette de la fibre et celle du guide, sont indispensables afin d'améliorer les performances optiques des *DWDM*. Ceci, afin de diminuer les pertes dues aux réflexions de Frenel et aux interférences entre la facette de la fibre et celle du guide. De plus, il est primordial de développer des techniques efficaces afin de mieux contrôler la connexion de bloc à fibres avec des guides à l'entrée/ sortie des *DWDM*.

La mise en boîtier du composant optique se veut une étape délicate et capitale pour le bon fonctionnement du composant *DWDM* et doit être bien adaptée afin d'assurer une étanchéité et une herméticité suffisantes au composant qui garantiront la stabilité de la réponse optique.

## BIBLIOGRAPHIE

- [Abr. B. 90]. **Abramoff B. and Klein L. C.**, "Sol-Gel optics", SPIE, (1990), **1328**, 241.
- [And. M. 97]. **Andrews M. P. and Najafi S. I.**, Critical Eds., in critical Rev. Conf. Sol-Gel Polymer Photon. Devices, SPIE, San Diego, CA, July 1997, **CR68**.
- [Bal. J. 96]. **Ballato J., Dejneka M., Riman R. E. and Snitzer E.**, "Sol-gel synthesis of rare-earth-doped fluoride glass thin films", J. Mater. Res. (1996), **11**, 841-849
- [Bar. A. 91]. **Barton A.**, "Handbook of solubility parameters and other cohesion parameters", CRC Press, 2<sup>e</sup> édition, (1991), 739.
- [Bar. A.72]. **Barker A. S.**, J. Phys. Rev. Lettre (1972), **28**, 892
- [Bee. G. 99]. **Beelen G., Linder P., Roeloffzen C.G. H., Driesssen A., Diemeer M. B. J., Leijtens X. J. M., Bakker A. F. and Krijger A. J. T.** "first Polymer-based reconfigurable add-drop multiplexer", ECOC 99, Nice, France, September (1999), Paper PD 3-7
- [Bor. M. 59] **Born M. and Wolf E.**, Principles of Optics Pergamon, (1959).
- [Bri. C. 90]. **Brinker C. J. and Scherer G. W.**, "Sol-Gel Science", Academic Press, New York, (1990).
- [Bur. W. 75]. **Burns W. K. and Milton A. F.**, "Mode conversion in planar-dielectric separating waveguide" IEEE J. Quantum Electron, (1975), **QE-11**(1), 32-39.
- [Car. J. 86]. **Cariou M., Dugas J., Martin L. and Michel P.**, "Refractive-index variations with temperature of PMMA and polycarbonate", Appl. Opt., (1986), **25**, 334
- [Chi. J. 95]. **Chisham J. E., Andrews M. P., Li C. Y., Najafi S. I. and Malek A.**, "Grating fabrication by ultraviolet light imprinting and embossing in a sol-gel silica glass", Conf. on Functional Photonic Integrated Circuits, San Jose, SPIE, Feb., 1995, **2695**, 52-56.
- [Cou. P. 96]. **Coudray P., Chisham J., Malek-Tabrizi A., Li C. Y., Andrews M. P., Peyghambarian N. and Najafi S. I.**, "Ultraviolet light imprinted sol-gel silica glass waveguide devices on silicon", Optics Comm., (1996), **128**, 19-22.
- [Cou. P]. **Coudray P., Chisham J., Andrews M. P., Malek-Tabrizi A. and Najafi S. I.**, "UV-light imprinted sol-gel silica glass low-loss waveguides for use at 1.55  $\mu$ m", Optical Engineering, in press.

[**Dra. C. 89]. Dragon C.**, "Efficient nxn star couplers using Fourier optics", J. Lightwave Tech. (1989), **7**(3), 479-488.

[**Dro. M. 95]. Dvorak M. D., Justus B. L., Gaskill D. K. and Hendershot D. G.**, "Nonlinear absorption and refraction of quantum confined In P nanocrystals grown in porous glass", Appl. Phys. Lett., (1995), **66**, 804-806

[**Ebe. M. 1845]. Ebelmen M.**, Comptes Rendus, Acad. Sci. Fr., (1845), 21.

[**Edd J. 92]. Eddy J. and Mackenzie D.**, 1- Sol-Gel optic –II, SPIE, Washington (1992).

[**Far. M. 97]. Fardad M. A., Touam T., Meshkinfam P., Sara R., Du X. M., Andrews M. P. and Najafi S. I.**, "UV-light imprinted Bragg grating in sol-gel ridge glass waveguide with almost 100% reflectivity", Electron. Lett., (1997), **33**, 1069.

[**Flo. J. 53]. Flory J. P.**, "Principles of polymer chemistry", Corell University Press, Ithaca, New York, (1953).

[**Flo. J. 74]. Flory J. P.**, "Gels and Gelling Processes", Disc. Faraday soc., (1974), **57**, 7-8.

[**For. R. 64]. Ford R. W.**, "Drying", Institute of ceramics, Textbook series, Maclaren and Sons, London, England (1964).

[**Gel J. 7<sup>th</sup>]. Gels J.**, "Proc. 7<sup>th</sup> Intl. Workshop on glasses and ceramics from gels", J. Sol-Gel Sci. and Tech.2.

[**Goo. J. 84]. Goodman J. W., Leonbergr F. J., Kung S. and Athale R.**, Proc. IEEE (1984), **72**, 850.

[**Gue. P. 96]. Guerreiro P.T., Lee S. G., Rodrigues A. S., Hu Y. Z., Wright E. M., Najafi S. I., Mackenzie J. and Peyghambarian N.**, " Femtosecond pulse propagation near a two-photon transition in a semiconductor quantum-dot waveguide", Optics Lett., (1996), **21**(9), 659-661

[**Hag. J. 89]. Hagerhorst-trewhe J. M, Gelorme J. D., Fan B., Speth A., Flagello D. and Oprysko M. M.**, "Polymeric Optical Waveguides", SPIE, Integrated optics and Optoelectronics, (1989), **1777**, 379-386.

[**Hei. G. 98]. Heise G., Achneider H. W. and Clemens P.C.**, "Optical phased array filter module with passively compensated temperature dependence", ECOC'98, Madrid, Spain, (1998), 319-320.

[**Hid. Y. 93]. Hida Y., Inoue H., Onose H. and Imamura S.**, "Polymer waveguide thermooptic switch with low electric power consumption at 1.3  $\mu$ m", IEEE Photon. Technol. Lett., (1993), **5**, 782

[Hie. P. 77]. **Hiemenz P. C.**, "Principles of Colloid and Surface Chemistry", Marcel Dekker, New-York, (1977).

[Kaw. M. 87]. **Kawachi M., Kobayashi M. and Miyashita T.**, "Proceeding of the european conference on optic's fiber communication, 87 (Helsinki)", Consulting Committee Of the Professional Electroengineering Organisation, Helsinki, Finland, (1987), 53.

[Kaw. M. 90]. **kawachi. M.**, "Silica waveguides on silicon and their application to integrated-optic components ", Opt. Quantum Electron, (1990), **22**, 391

[Kle. L. 88]. **Klein L. C.** "Sol-Gel Technology", Ed., Noyes, Park Ridge, (1988).

[Kok. Y. 94] **Kokubun Y., Takizawa M. and Taga S.**, "Tree-dimentional athermal waveguides for temperature independant lightwave devices", Electron. Lett., (1994), **30**(15),1223-1225

[Kru. H. 92]. **Krug H., Tiefensee F., William P. Oliveira, and Schmidt H.**, Proc-SPIE, (1992), **1758**, 448

[Li C. 95]. **Li C. Y., Chisham J., Andrews M. P., Najafi S. I., Mackenzie J. D. and Peyghambarian N.**, "Sol-gel integrated optics coupler by ultraviolet light imprinting", Electronics Lett., (1995),**31**(4), 271-272

[Liv. J. 82]. **Livage J. and Lemerle J.** "Transition metal oxide gels and colloids", Ann. Rev. Mater. Sci., (1982), **12**, 103-122.

[Mac. J. 90]. **Mackenzie J. D. and Ultrich D. R.** "Sol-Gel Optics", SPIE Proceedings, (1990), **1328** and (1992), **1758**.

[Mar P. 97]. **Andrews M. P. and. Najafi S. I.**, "Passive and active Sol-Gel materials and devices", Critical Review Conference Sol-Gel Polymer photonic devices, SPIE, San Diego, Vol. CR68, (1997), 253-285.

[Mat. A. 90]. **Matsuda A., Matsumo Y., Kataoka S., Katayama S., Tsuno T., Tohge N. and Minami T.**, "Pregrooving on glass disks by the sol-gel methods: effect of the addition of organic polymers on the formation of glass films in the  $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2$  systhem", Conference on Sol-Gel optics, SPIE, (1990), **1328**, 71-79.

[Mat. E. 77]. **Matjevic E.**, "Monodispersed (Hydrous oxides)-A Fascinating field of colloid science", Acc. Chem. Res., (1977), **14**, 11-18.

[McE. J. 96]. **McEntee J.**, "Sol-gel devices will meet cost targets of fibre to the home", Opto and Laser Europe, June 1996, 5.

[Mic. A. 94]. **Alain Rolf Mickelson**, "Guided wave optics", Van Nostrand Reinhold, New York, (1994).

[Mic. P. 86]. Michel P., Dugas J., Cariou J. M. and Martin L., "Thermal variation of refractive index of PMMA, Polystyrene and poly-(4methyl 1pentene)", J.. Macromol. Sci. Phys., (1986), **B25**, 37

[Mil. S. 69] Miller S. E., Bell Syst. Tech. J., (1969), **48**, 2059-2069

[Naj. S. 92]. Najafi S. I., "Introduction to Glass Integrated Optics", MA: Artech House, Boston, (1992), 108.

[Naj. S. 96]. Najafi S. I., Andrews M. P., Fardad M. A., Milova G., Touam T. and Coudray P., "UV-light imprinted surface, ridge and buried sol-gel glass waveguides and devices on silicon", Invited paper, Conference on integrated optics for signal processing, Berlin, (1996), October, 10-15.

[Naj. S. 96]. Najafi S. I., Andrews M. P., Fardad M. A., Touam T. and Coudray, "UV-light imprinted surface, ridge and buried sol-gel glass waveguides and devices on silicon", Conf. Integrated Optic for signal processing, Berlin, October 1996, 10-15 (Invited paper)

[Naj. S. 98] Najafi S. Iraj, Touam T., Sara R., Andrews M. P. and Fardad M.A., "Sol-Gel Glass Waveguides and Grating on Silicon", J. Lightwave Technology, (1998), **16**, 1640

[Nic. H. 85] Nishihara H., Huruna M. and Suhara T. "Optical Integrated Circuits" (1985).

[Nis. H. 89]. Nishihara H., Haruna M. and Suhara T., "Optical integrated circuit" McGraw-hill, New York, (1989), 325.

[Nov. A. 86]. Novembre A., Masakowski L., Hartney M., "Optimal developer selection for negative acting resist" , Polymer engineering and Science, Mid-September,. 1986, **26**(16), .1158

[Nov. B. 93]. Novak B. "Hybrid nanocomposite materials-Between inorganic glasses and organic polymers", Advanced materials, (1993), **5**, 422

[Pit. C. 99]. Pitois C., Vukmirovic S., Hult A. and Wiesmann D., "Low-loss Optical Waveguides based on photosensitive poly (pentafluorostyrene-co-glycidyl methacrylate", Macromolecules, (1999), **32**(9), 2903.

[Rei. R. 92]. Reisfeld R. and Jorgeusen C. K., "Structure and bonding", (1992), **77**, 207.

[Sal B.]. Saleh B. E. A. and Teich M. C., "fundamental of optics". John wiley and sons, wiley series in pure and applied optics ed.

[Sar. K. 98]. Saravanamuttu K., Du X. M., Najafi S. I. and Andrews M. P., "Photoinduced structural relaxation and densification in sol-gel derived nanocomposite

thin films: implications for integrated optics device fabrication", *Can. J. Chem.*, (1998). **76**, 1717

[Sch. H. 92]. **Schmidt H.**, "Chemistry, Spectroscopy and Applications of Sol-Gel Glasses, Springer-Verlag", 1992.

[Sek. M. 84]. **Seki M., Sugawara R., Hashizume H. and Okuda E.**, "Proceedings of the optical fiber communication", Washington D.C., (1989), deadline Paper 4.

[Sel. J. 87]. **Seligson J.** "Prism coupleurs in guided wave-optics: design consideration", *Appl. Opt.*, (1987), **26**(13), 2609-2611.

[Sey. D. 84]. **Seyferth D., Wiseman G. H.**, "Silazane precursors to Silicon Nitride "; in "Ultrastructure Processing of ceramics, Glasses and Composites", Edited by hench L. L. and Ulrich D. R., Wiley, New-York, (1984), 265-271.

[Shm. H. 84]. **Shmidt H.**, in "Better Ceramics Through Chemistry Mater", *Res. Soc. Proc.*, (1984), **32**, 327.

[Sla. A. 98]. **Slama-Schowok A., Amir D., Ottolenghi M.**, *J. Phys-Chem.*, (1998), **93**, 7544.

[Sul. C. 88]. **Sullivan C. T.**, "Optical waveguide circuits for printed Wirw Board Interconnections", *Appl. Opt.*, (1988), **27**, 4565-4571.

[Sym. R. 94]. **Syms R. R.**, "Silica on silicon integrated optics", in *Advances in Integrated Optics*, Martelluci S., Chester A. N. and Bertolotti M. (Ed.s), Plenum Press, New York, (1994), 121-151.

[Sze S. 85]. **Sze S. M.**, "Semiconductor devices physics and technology", Murray Hill, New Jersey, (1985), 382-427.

[Tak. H. 95]. **Takahashi H. and Toba H.**, "transmission characteristics of arrayed waveguide nxn wavelength multiplexer", *J. Lightwave Tech.*, (1995),**13**(3), 447-454)

[Tou. T. 97]. **Touam T., Milova G., Saddiki Z., Andrews M. P., Chrostowski J. and Najafi S. I.**, "Organocaluminophosphate sol-gel silica glass thin films for integrated optics", *Thin Solid Films*, (1997), **307**, 203.

[Wat. I. 90]. **Watanabe I., Cheung J. H. and Rubner M. F.**, "Infrared Reflection/Absorption and Transmission Studies of LB Films of Poly (3-Alkyl Thiophene) and Stearic Acid", *J. Phys. Chem.*, (1990), **94**, 8715.

[Wat. T. 97]. **Watanabe T., Inoue Y., Kaneko A.,Ooba N. and kurihara T.** "Polymeric Arrayed-Waveguide grating multiplexer with widw tuning range", *Electron. Lett.*, (1997), **33**(18), 1547-1548.

**[Yan. L. 94]. Yang L., Saavedra S. C., Armstrong N. R. and Hayes J.,** "Fabrication and characterization of low-loss sol-gel planar wave guides", *Anal. Chem.*, (1994), **66**, 1254-1263

## **ANNEXE A**      **COUPLAGE PAR PRISME**

### **A-1    Méthode du couplage par prisme**

À l'heure actuelle, il existe une variété étonnante de coupleurs optiques [Eddy. J. 92] [Gels. J. 7<sup>th</sup> Intl]. Nous analyserons les principes et les fonctionnements sous-jacents à un type particulier de coupleur: le coupleur à prisme.

Le couplage d'un faisceau laser dans une structure plane par le moyen d'un prisme coupleur est largement considéré. Ainsi, le prisme coupleur est souvent utilisé dans les montages optiques dans le but de coupler le faisceau lumineux d'une onde optique de surface (*optical surface wave*) à un guide d'onde. De plus, cette technique est utilisée par les physiciens pour étudier d'autres propriétés des ondes de surfaces tels que les phonons, les magnons, et les exitons [Mickelson. A. 94]. Vu son intérêt majeur, beaucoup de travaux ont contribué à la fondation d'une théorie sophistiquée et complète. Par la suite des travaux expérimentaux ont montré l'efficacité du prisme coupleur dans une large bande d'opérations [Najafi. S. I. 92] [Barker. A. S. 72].

### **A-2    Détermination de l'indice effectif**

La technique du couplage est probablement l'une des techniques expérimentales les plus utiles en optique intégrée. En effet, bien qu'elle soit d'une très grande simplicité, elle permet de mesurer les indices effectifs d'un guide plan avec une précision de l'ordre de  $2.10^{-4}$ . [Najafi. S. I. 92]. De plus, le montage ne requiert que peu d'éléments. Son schéma est représenté à la **Figure A-1**.

Le principe de ce montage est le suivant: on envoie un faisceau laser sur un prisme d'indice de réfraction  $n_p$  au point O. Comme ce faisceau passe préalablement à travers un polariseur, on peut isoler les deux polarisations *TE* et *TM*. La lumière dévie en passant dans le prisme et se réfléchie totalement sur la face du prisme qui est en contact avec le guide d'onde. Ceci donne lieu à un champ évanescence entre les deux. À ce moment, pour

certaines valeurs discrètes de l'angle  $I$ , la composante longitudinale du vecteur d'onde,  $\beta_{prisme}$ , se couple dans le guide d'onde. Il faut cependant que le prisme respecte certaines conditions [Seligson. J. 87]. On a alors :

$$\beta_{prisme} = k \cos \gamma = n_p k_0 \cos \gamma = \beta_{guide} = k_0 N_{eff}. \quad A-1$$

Selon la **Figure A-1** on déduit aisément la relation géométrique suivante:

$$\gamma = \frac{\pi}{2} - r - A. \quad A-2$$

En insérant l'équation A-2 dans l'équation A-1 et en se servant de la loi de Snell-Descartes, on tire immédiatement la formule suivante:

$$N_{eff} = n_p \sin \left[ \arcsin \left( \frac{\sin i}{n_p} \right) + A \right]. \quad A-3$$

C'est cette formule qui permet de calculer les indices effectifs d'un guide plan pour les polarisations  $TE$  et  $TM$ . En faisant pivoter le prisme et le guide d'onde autour de l'axe  $O$ , on pourra observer directement sur un écran le guide devenir lumineux. Les différents angles qui satisfont à cette condition peuvent être ainsi mesurés et par l'équation A-3, les indices effectifs sont alors connus.

### A-3 Détermination de l'épaisseur de film

On considère un guide d'ondes plan (*slab*), on suppose que la lumière se propage suivant l'axe  $z$ , que le confinement transversal se fait suivant l'axe  $x$  et que la lumière et la structure sont uniforme dans la direction  $y$  perpendiculaire au plan  $xz$ . Dans ce cas et d'après le modèle géométrique, la lumière voyage le long du film d'une façon zig-zag. Voir **Figure A-2**.

Pour un mode guidé dans un guide plan, le modèle zig-zag donne la constante de propagation  $\beta$  (liée à la vitesse de phase) :

$$\beta = w / v_p = k n_f \sin \theta \quad A-4$$

qui représente la composante suivant  $z$  de vecteur d'onde  $kn_f$ . Cependant, les angles  $\theta$  ne sont pas tous permis, seules les valeurs discrètes (parfois aucune) de  $\theta$  permettent le guidage des modes guidés par la structure

Pour un film d'épaisseur  $h$  on a, spécifiquement, un déphasage de  $kn_f h \cos \theta$  causé par le premier passage transverse à travers le film, la réflexion totale à l'interface film-cover donne un déphasage de  $-2\Phi_c$ , un autre déphasage  $kn_f h \cos \theta$  est causé par le passage transverse de l'onde vers le bas et un déphasage de  $-2\Phi_s$  résultant de la réflexion totale à l'interface film substrat. Ainsi, on a la condition de résonance transverse :

$$2kn_f h \cos \theta - 2\Phi_c - 2\Phi_s = 2m\pi \quad \text{A-5}$$

où  $m$  est un entier qui identifie le nombre de mode. Les déphasages  $\Phi_c$  et  $\Phi_s$  sont fonction de  $\theta$  :

Pour la polarisation  $TE$  on a :

$$\tan \Phi_c = \sqrt{n_f^2 \sin \theta - n_c^2} / (n_f \cos \theta), \quad \text{A-6}$$

$$\tan \Phi_s = \sqrt{n_f^2 \sin \theta - n_s^2} / (n_f \cos \theta), \quad \text{A-7}$$

Pour la polarisation  $TM$  on a :

$$\tan \Phi_c = \frac{n_f^2}{n_c^2} \sqrt{n_f^2 \sin \theta - n_c^2} / (n_f \cos \theta), \quad \text{A-8}$$

$$\tan \Phi_s = \frac{n_f^2}{n_s^2} \sqrt{n_f^2 \sin \theta - n_s^2} / (n_f \cos \theta). \quad \text{A-9}$$

L'équation A-9 est essentiellement l'équation de dispersion qui donne la constante de propagation  $\beta$ . Elle est fonction de la fréquence  $\omega$  de champ et de l'épaisseur  $h$  du film.

Pour les modes guidés,  $\beta$  est limitée par les deux constantes de propagation de l'onde plane du substrat et celle du film :

$$kn_s < \beta < kn_f \quad \text{A-10}$$

Ainsi l'indice effectif, défini comme  $N = \beta/k$ , est limité par :

$$n_s < N < n_f$$

A-11

Pour obtenir la courbe  $\beta(\omega)$  d'une façon plus précise, on doit évaluer l'équation A-9 d'une façon numérique. Pour ce faire, on introduit des normalisations qui combinent plusieurs paramètres. Premièrement, on définit la fréquence normalisé  $V$  par

$$V = kh\sqrt{n_f^2 - n_s^2}, \quad \text{A-12}$$

l'indice de guide normalisé  $b$  relié à l'indice effectif  $N$  (et  $\beta$ ) par

$$b = (N^2 - n_s^2) / (n_f^2 - n_s^2), \quad \text{A-13}$$

finalement, on introduit le paramètre d'asymétrie de la structure de guide d'onde définit par :

$$a = (n_s^2 - n_c^2) / (n_f^2 - n_s^2). \quad \text{A-14}$$

Pour les modes  $TE$ , on utilise A-10 et A-11 avec la normalisation ci dessus, pour écrire l'équation de dispersion A-9 qui devient :

$$V = \sqrt{1-b} = m\pi + \tan^{-1} \sqrt{b/(1-b)} + \tan^{-1} \sqrt{(b+a)/(1-b)} \quad \text{A-15}$$

Connaissant  $N_m$ ,  $n_s$ ,  $n_f$ ,  $n_c$  et  $\lambda$  et en résolvant l'équation A-9 on déduira la valeur de  $h$ .

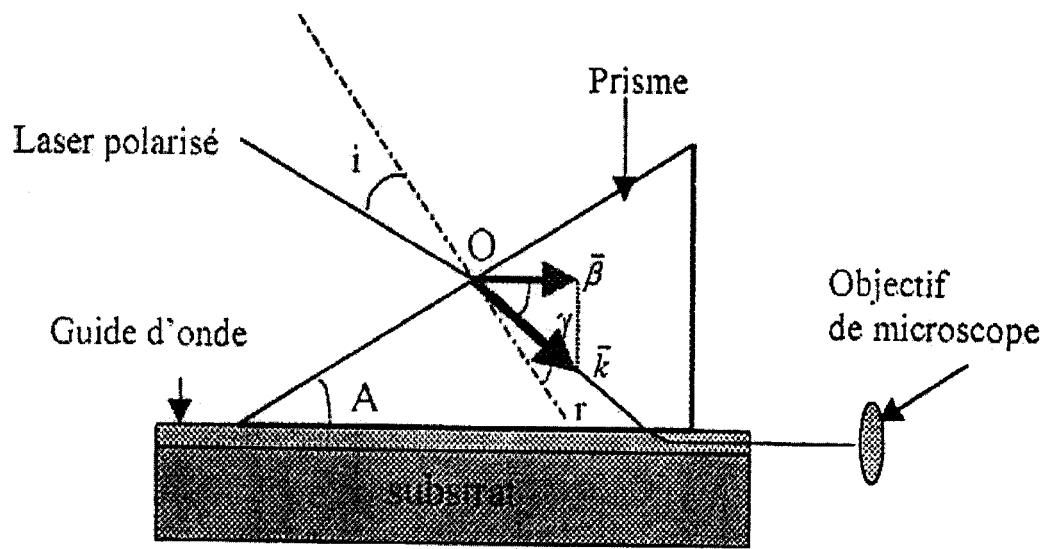


Figure A-1 : Schéma du montage par prisme

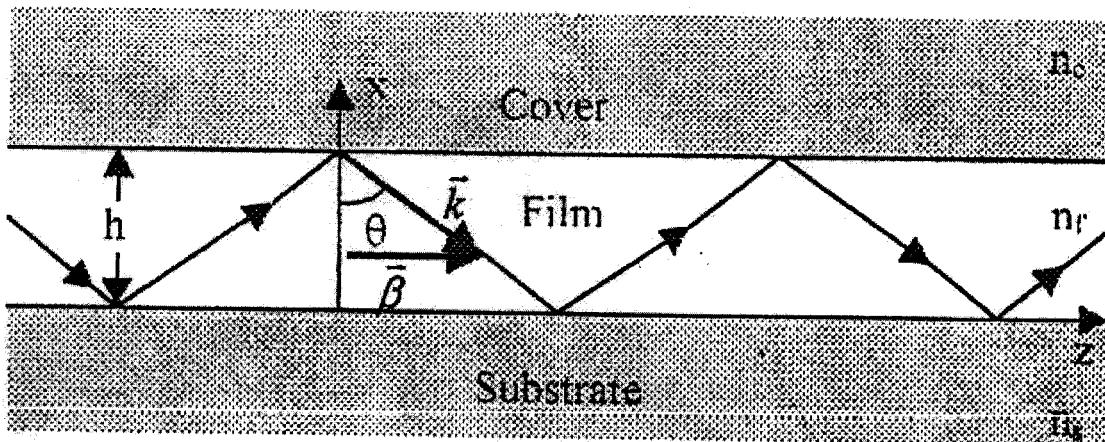


Figure A-2 : Vue de face d'un guide d'onde plane montrant un mode qui se propage suivant un parcours zig-zag.

## **APPENDICE B** LE PROTOCOLE DE MESURE POUR EFFECTUER UNE CARACTÉRISATION SOMMAIRE D'UN COMPOSANT DWDM

L'une des principales activités de mon projet de recherche, fut de caractériser les composants DWDM. Ces derniers sont conçus pour fonctionner dans le domaine spectral de *1300 nm* ou *1500 nm*.

Dans les sections ci-dessous, nous avons définie les paramètres optiques qui caractérisent la performance optique du composant DWDM ainsi que la méthode et le montage de mesures optiques.

### **B-1 Préparation des éléments nécessaires aux mesures**

Avant toute caractérisation, il est très important de vérifier le bon états des connecteurs de chacune des fibres employées pour la mesure: un mauvais connecteur (défectueux ou sale) faussera la mesure et pourra également, au contact d'une deuxième fibre (au moyen d'un adaptateur), endommager le connecteur de celle-ci.

#### **B-1.1 Utilisation de l'isopropanol pour le nettoyage**

L'isopropanol est un solvant très volatile et n'altère pas la fibre, ce qui permet un nettoyage rapide et efficace de celle ci et de l'extrémité des connecteurs en général.

#### **B-1.2 Utilisation du « Dust off » (air comprimé et sec)**

Après avoir nettoyé le connecteur, il faut s'assurer que l'extrémité de la fibre (ou du connecteur) est bien sèche et dépourvue de toute poussière: on utilise pour cela de l'air comprimé, filtré et sec.

### B-1.3 Observation du connecteur au microscope à fibre « fiberscope »

Ultimes étapes avant de débuter les mesures: on vérifie, à l'aide d'un microscope spécialement adapté pour l'observation des connecteurs « fiberscope », que l'extrémité de la fibre est parfaitement propre et non endommagé.

Enfin, on s'assure que l'échantillon ne présente aucun défaut visible: guide coupé, mauvais clivage, etc.... Si l'échantillon présente des défauts, il sera rejeté.

## B-2 Différentes phases de la mesure optique

### B-2.1 Disposition de l'échantillon sur le bâti d'alignement (*setup*)

Au moyen d'une pince, on place l'échantillon à caractériser sur un support (*holder*) du système optique (équipé d'un système d'aspiration) en vue d'aligner une fibre optique avec le guide d'entrée du dispositif et une autre fibre avec l'un des guides de sortie.

On active ensuite le système d'aspiration (*vaccum*) qui assure un positionnement constant de l'échantillon pendant toute la mesure.

### B-2.2 Alignement des fibres entrée/sortie

On effectue d'abord une approche grossière des fibres et on réalise le couplage, en entrée puis en sortie, de celles-ci avec le composant DWDM en utilisant, comme source lumineuse, un laser Hélium-Néon (*HeNe*,  $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ ) puisqu'il émet dans le domaine des longueurs d'onde visibles.

### B-2.3 Couplage

Le couplage fibre/guide est une étape cruciale de la caractérisation: elle consiste à positionner la fibre face à l'entrée du guide, parallèlement, de manière à injecter la lumière dans celui ci, de la manière la plus rectiligne possible, et limiter ainsi au maximum, toute dispersion de la lumière à cet endroit. De plus, le bon état de l'extrémité de la fibre et du guide est indispensable pour la réalisation des mesures optiques fiables.

Par la suite en affirme le réglage au moyen de micro-positionneurs, ils permettent des déplacements micrométriques de la fibre selon six degrés de libertés.

#### **B-2.4 Utilisation de la source large bande (SLB) à $1.55 \mu m$ et de l'analyseur de spectre optique**

Après une première optimisation approximative qui consiste à maximiser la puissance de laser *HeNe* collectée par la fibre de sortie. Ensuite, on connecte, dans un premier temps, la fibre d'entrée à la source large bande (BroadBand source) qui émet dans le spectre *1500-1600 nm* et, afin d'effectuer une prévisualisation rapide du comportement de l'échantillon autour de *1.55  $\mu m$*  (domaine des télécommunications), on connecte la fibre de sortie à un analyseur de spectre optique (*OSA*). Cette source permet, à l'encontre du laser à *1.3  $\mu m$*  (laser accordable), d'obtenir très rapidement, à l'*OSA*, l'allure complète du spectre caractéristique du canal étudié. En effet, à *1300 nm*, l'obtention d'une bonne précision de toutes les longueurs d'ondes qui constituent le spectre d'un canal, nécessite un examen long qui peut prendre jusqu'à *20 minutes*, notamment à cause de la compatibilité des temps de réponse de l'*OSA* et du laser.

En plus du gain du temps de mesure, l'autre raison pour laquelle nous effectuons une rapide vérification à *1550 nm* vient du fait que nous avons constaté que l'échantillon conservait des caractéristiques proportionnellement comparables (forme du canal, ordre de grandeur des pertes d'insertion, diaphonie, etc..) entre une étude à *1550 nm* et une étude à *1300 nm*.

On active ensuite une recherche automatique (Auto-mesure), à l'*OSA*, du spectre du signal présent à la sortie du guide.

Après une optimisation des paramètres de cet appareil de mesure telles que la résolution en abscisse (longueur d'onde) et en ordonnée (puissance en *dBm*), ainsi que l'optimisation du couplage, on peut relever, grâce au système informatique associé au bâti de mesure, la courbe caractéristique de la puissance optique issue de l'une des sorties du dispositif *DWDM*, en fonction de la longueur d'onde.

C'est ainsi que tous les échantillons sont d'abord testés rapidement à *1550 nm* et que chaque composant *DWDM*, dont la réponse spectrale donne des résultats satisfaisants à cette longueur d'onde, est caractérisé avec le laser à *1300 nm*.

### B-2.5 Étude à 1.3 $\mu\text{m}$

On commence par connecter la fibre d'entrée au laser à  $1300\text{ nm}$ , puis on effectue une dernière optimisation du couplage pour cette longueur d'onde. Ensuite en premier lieu et à l'aide de l'*OSA*, on localise le spectre du canal, par un balayage rapide (du laser) en longueur d'onde. En deuxième lieu, on programme le laser pour obtenir un balayage beaucoup plus lent (en général sur  $10\text{ nm}$ ), pour pouvoir relever un tracé précis de la puissance optique à la sortie du guide étudié en fonction de la longueur d'onde.

### B-2.6 La référence

Pour chaque échantillon, après avoir caractérisé chacune des sorties du composant *DWDM*, il est nécessaire, pour connaître les pertes réelles de puissance dans celui ci, de procéder à la mesure de la référence. Cette dernière est prise comme étant égale à la puissance relevée en sortie d'un couplage fibre à fibre. Cette puissance est alors déduite de chacune des caractéristiques de puissance définissant les différentes sorties du dispositif. La puissance résultante correspond exactement aux pertes dues à la propagation dans l'échantillon.

## B-3 Établissement de la fiche d'identité du composant

Comme ultime étape de cette procédure avant l'archivage: nous procédons, pour chaque sortie, à un relevé de l'intégrité du spectre de puissance au moyen d'une carte d'acquisition de données et d'un ordinateur.

Il en résulte, si nous prenons l'exemple d'un échantillon *DWDM (1x8)* (une entrée et huit sorties), 8 spectres indépendants qu'une macro, développée sous Excel, va nous permettre de réunir afin d'obtenir l'intégralité du spectre des sorties des 8 canaux de composant *DWDM*. Cette macro nous permet également, après un rapide calcul, de connaître notamment la perte d'insertion, la longueur d'onde centrale de chaque canal, la bande passante à  $-1\text{ dB}$ ,  $-3\text{ dB}$ ,  $-10\text{ dB}$ ,  $-20\text{ dB}$ , la diaphonie, etc..

## B-4 Archivage des informations

Avec une deuxième macroExcel, nous établissons finalement la fiche d'identité (*datasheet*) du composant. Cette fiche réunit les données concernant le procédé de la micro-fabrication et celles concernant les matériaux utilisés ainsi que les résultats obtenus par la caractérisation optique afin d'assurer un suivi rigoureux des résultats de nos recherches.

## B-5 Tests optiques sur les composants *DWDM*: Paramètres à caractériser

### B-5-1 Introduction

Les composants *DWDM* sont devenus des éléments clés dans l'architecture des nouveaux réseaux de télécommunications. La demande, sans cesse croissante, de bande passante supplémentaire obligent les chercheurs à développer des dispositifs aux performances toujours plus grandes et au caractéristiques toujours plus poussées.

La caractérisation des composants de *DWDM* implique un ensemble de paramètres complexes. Malheureusement, dans les définitions de ces paramètres, il peut y avoir des confusions dues à deux facteurs. Premièrement ces définitions ne sont pas entièrement normalisées, bien que quelques définitions le soient par des organismes de standardisation tels *EIA/TIA* (*Electronic Industries Alliance/Telecommunications Industry Association*), *IEC* (*International Engineering Consortium*) et *ITU* (*International telecommunication Union*). En second lieu, les paramètres critiques et donc leur définition peuvent différer selon le système de télécommunications où le *DWDM* est utilisé. En conséquence, la manière dont les constructeurs ou les clients indiquent l'exécution d'un dispositif diffère largement.

Dans le contexte de recherche et de développement où des dispositifs sont testés au niveau de la puce, quelques paramètres de spécification ne sont pas mesurés; cependant, d'autres informations spécifiques pour l'analyse des performances des composants sont indispensables. En conséquence, la table de spécification que nous utilisons peut être différente de celle éditée ou soumise aux clients.

Nous exposons les différents paramètres des dispositifs *DWDM* qui font l'objet d'une caractérisation approfondie, la précision et la validité de ces paramètres. Nous présentons également le protocole concis pour les mesures de ces différents paramètres.

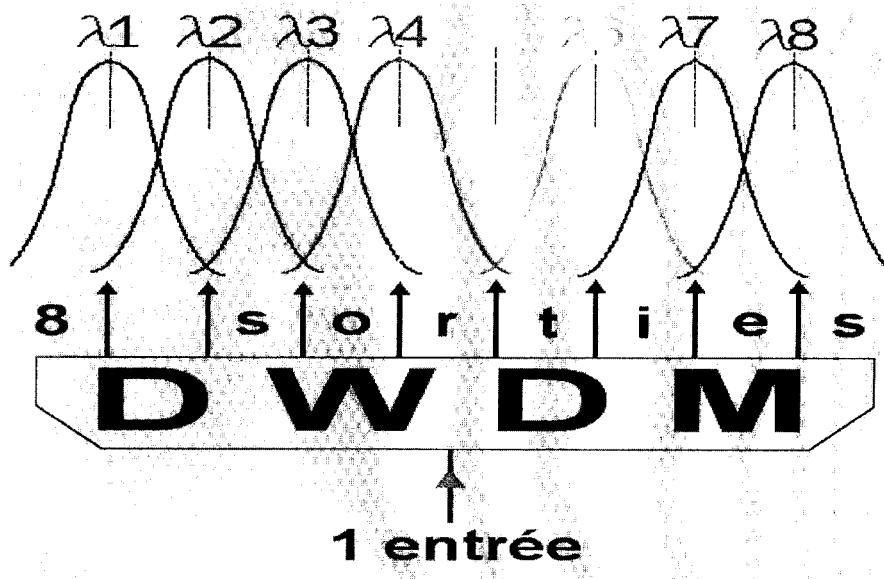
### B-5-2 Longueur d'onde nominale (*Nominal wavelength*)

La longueur d'onde nominale d'un dispositif *DWDM* correspond à la longueur d'onde pour laquelle cette sortie a été conçue. Celle-ci doit donc correspondre au mieux à l'une des longueurs d'onde qui constituent le spectre que l'on relève en sortie du composant, après test: idéalement, elle correspond parfaitement à l'une d'elles.

L'espacement en longueur d'onde, entre chacune d'elles correspond à l'écart entre les canaux de sortie du système défini par la norme *ITU (International Télécommunication Union.)*, généralement un multiple de *100 GHz*.

Ce paramètre est définissable au moment de la conception, les mesures pratiquées par la suite sur les échantillons nous permettent de vérifier si le dispositif est alors conforme ou non aux spécifications du design.

Ci-dessous, une illustration des longueurs d'onde nominales d'un *DWDM 1x8*.



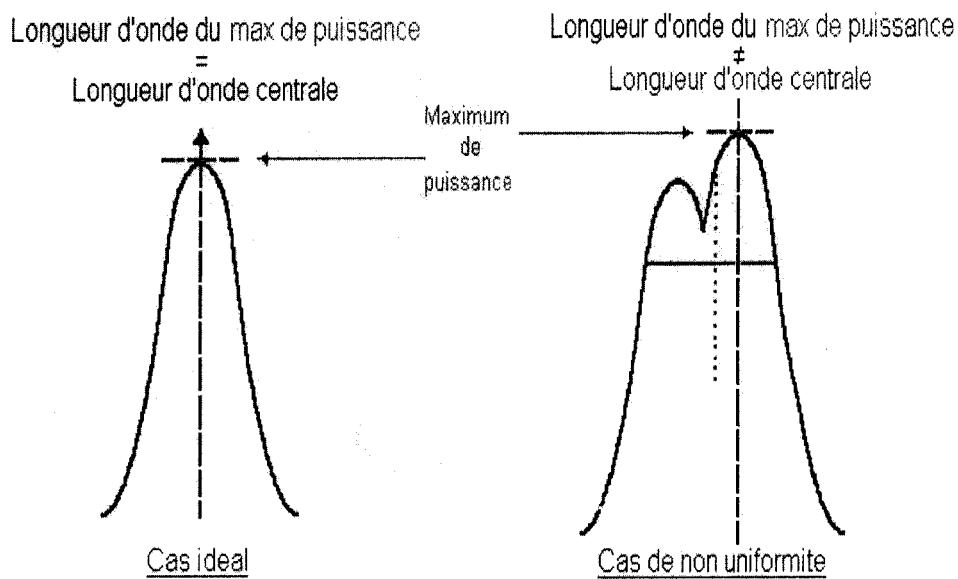
**Figure B-1 :** Illustration des longueurs d'onde nominales d'un *DWDM 1x8*.

### B-5-3 Longueur d'onde du maximum de puissance

La longueur d'onde du maximum de puissance d'une sortie est définie comme étant égale à la longueur d'onde pour laquelle on observe la plus petite perte d'insertion entre l'entrée et la sortie du dispositif.

Dans le cas idéal, cette longueur d'onde et la longueur d'onde nominale coïncident: un signal (laser), injecté à cette longueur d'onde, présentera un minimum d'atténuation. Toutefois, il est recommandé d'effectuer la mesure de cette longueur d'onde avec une source non polarisée (source large bande, par exemple) afin d'éliminer l'influence éventuelle de la polarisation sur le dispositif (la polarisation entraîne une variation de la puissance à la sortie de celle-ci) et de rendre les mesures stables et reproductibles.

Dans le cas où l'on ne disposerait pas de ce type de source (non polarisée), on peut choisir de définir la puissance à considérer comme étant égale à la moyenne du minimum et du maximum des pertes d'insertion relevée au cours d'un test de dépendance à la polarisation (*PDL*), comme on le présentera par la suite.



**Figure B-2 :** Illustration de la longueur d'onde du maximum de puissance dans deux cas différents.

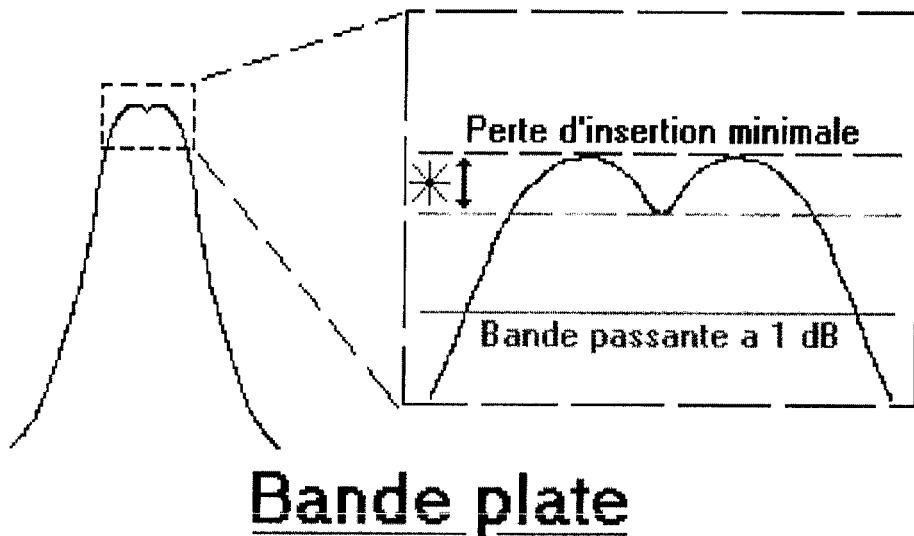
Comment mesure t'on ce paramètre?

La macro développée sous Excel détermine directement le maximum de puissance (le minimum de perte) de chaque canal en examinant rapidement chacune des valeurs de puissance enregistrées correspondant à la courbe(spectre) donnée par l'analyseur de spectre optique (*OSA*), suite à une caractérisation comme décrit dans le protocole.

Une fois cette puissance identifiée, le logiciel relève la longueur d'onde associée à celle-ci. Ce paramètre est souvent donné en nanomètres.

#### B-5-4 Bande plate

Lorsque l'on s'attarde sur le sommet du spectre obtenu à la sortie d'un canal d'un composant *DWDM*, il est possible de constater que celui-ci ne sera pas toujours parfaitement uniforme: La valeur de la perte d'insertion nous renseigne sur la perte de puissance à une certaine longueur d'onde mais ne nous donne aucun renseignement quant à l'allure de sa variation sur toute la bande passante définie par la norme *ITU*. On emploi donc le terme de bande plate pour décrire ce phénomène de fluctuation de puissance au sommet du canal comme schématisé ci-dessous.



**Figure B-3 :** Schématisation de la bande plate.

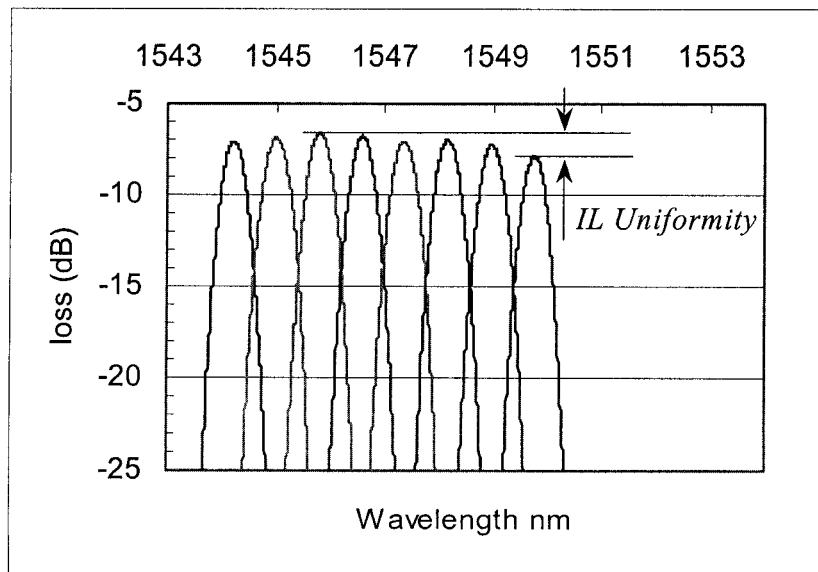
L'évaluation de la bande plate permet au concepteur de dispositif d'obtenir des informations sur les possibles variations de la puissance transmise en sachant qu'un léger décalage en longueur d'onde peut, dans un tel cas, modifier la valeur de la puissance au point, parfois de rendre, le dispositif inutilisable.

#### Comment mesure t'on ce paramètre?

La bande plate est égale à la différence entre le maximum de la puissance (i.e minimum de perte d'insertion) et la puissance au bas de la fluctuation, relevée au-dessus d'une certaine bande passante, choisie à  $-1 \text{ dB}$  ou  $-3 \text{ dB}$  par exemple. En fonction de l'importance de la variation: on parle de bande plate à  $1 \text{ dB}$ ,  $3 \text{ dB}$ ....

#### **B-5-5 Uniformité**

Ce paramètre, également défini dans les spécifications actuelles, rend compte de la qualité de l'ensemble de la réponse du composant *DWDM*: l'uniformité est la différence de puissance entre le canal affichant le moins de perte d'insertion et celui en affichant le plus, comme visualisé dans la figure ci- dessous.



**Figure B-4 :** Illustration de l'uniformité de la réponse optique d'un *DWDM*.

### Comment mesure t'on ce paramètre?

La macro relevant rapidement les pertes d'insertion de chaque canal à la fin de la caractérisation, peut ensuite, par simple comparaison entre elles, définir la plus importante et la moins importante et en faire la soustraction. Cette mesure est donnée en *dB*.

#### **B-5-6 Perte d'insertion**

La perte d'insertion est sans doute le paramètre à qui l'on confère le premier intérêt. Elle est définie comme étant égale à la différence, en *dB*, entre la puissance optique à l'entrée et la puissance optique à la sortie du composant testé à la longueur d'onde nominale (ou central), soit:

$$IL(dB) = P_{in}(dBm) - P_{out}(dBm) \quad \text{B-1}$$

Elle qualifie la perte de puissance pour une longueur d'onde spécifique ou pour une région donnée du spectre mais, le plus souvent, la définition retenue est celle de la puissance correspondante à la longueur d'onde centrale calculée.

Ce paramètre doit, bien sur, être le plus faible possible (aussi proche de 0 *dB* que possible). L'une des meilleures façons de définir la perte d'insertion serait de la prendre comme égale à la valeur du point le plus haut (en terme de perte) située dans la zone de tolérance, fixée par *ITU*, autour de la longueur d'onde centrale. Voir la figure ci dessous. Dans le cas d'un *DWDM*, la perte d'insertion fait référence à la perte minimale dans la bande de transmission de l'échantillon.

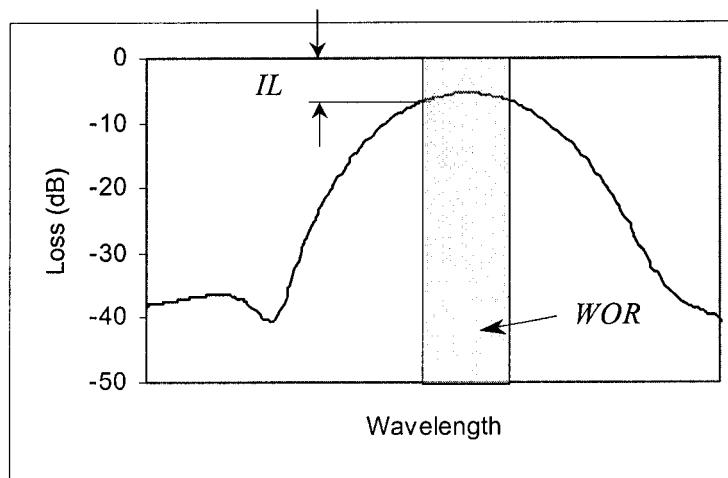
La mesure de ce paramètre se pratique aussi, de préférence, avec une lumière non polarisée.

### Comment mesure-t-on ce paramètre? :

Pour quantifier la perte d'insertion d'un composant *DWDM*, il est nécessaire d'établir la réponse spectrale de celui-ci comme décrit dans la partie «protocole de mesure sommaire pour effectuer la caractérisation d'un composant *DWDM*».

Après un alignement avec les fibres en entrée et en sortie, on relève grâce à l'analyseur de spectre, la puissance issue du guide en sortie, à laquelle il faut déduire la puissance, dite de référence, récupérée en sortie d'un couplage fibre à fibre.

Cette mesure peut être réalisée avec une source polarisée (laser) ou non polarisée (source large bande), mais dans les deux cas la valeur de la perte d'insertion est nominale; donc, pour connaître réellement la perte maximale que l'on peut rencontrer avec l'échantillon considéré, il est nécessaire d'effectuer un test de dépendance à la polarisation (*PDL*).



**Figure B-5:** définition de la perte d'insertion pour un canal d'un *DWDM*. *WOR* est l'intervalle d'opération en longueur d'onde.

### B-5-7 Espacement entre les canaux (*Channel Spacing*)

Ce paramètre est égal à la distance (le plus souvent en nanomètres) séparant deux canaux adjacents sur le spectre de sortie du composant *DWDM*. Il est fonction de la fréquence de la longueur d'onde pour laquelle le dispositif doit fonctionner.

On peut le calculer à partir de la formule suivante:

$$C = \lambda \cdot f \quad \text{par dérivation on obtient: } f d\lambda = \lambda df \quad (\text{au signe près}).$$

$$\text{On a encore } f/\lambda = df/d\lambda$$

$$\text{Et comme } f = c/\lambda$$

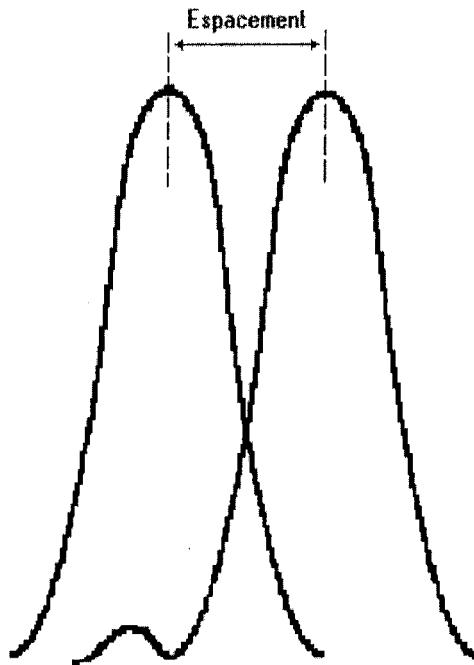
$$\text{D'où } df/d\lambda = c/\lambda^2$$

$$\text{Finalement } d\lambda(\text{nm}) = df(\text{GHz}) \cdot \lambda^2 / c$$

Ainsi par exemple, pour:

$df=100GHz$  et  $\lambda=1550nm$  ce qui donne un  $d\lambda=0.8nm$

$df=400GHz$  et  $\lambda=1300nm$  ce qui donne un  $d\lambda=2.25nm$



**Figure B-6 :** Espace entre les canaux.

#### **B-5-8 Largeur de bande (bande passante) à 1dB, 3dB, 10dB et 20dB**

La largeur de bande à « $x$ » dB correspond à la largeur spectrale de la caractéristique obtenue à la sortie d'un des guides à ce niveau « $x$ » de la puissance maximale: une bande passante donnée sans cette valeur « $x$ » n'a aucune signification.

Ainsi, si l'une des sorties d'un dispositif DWDM affiche une perte d'insertion maximale de  $-5$  dB, donner sa largeur de bande à  $-10$  dB signifie relever la largeur spectrale (souvent en nanomètres) de la caractéristique à  $-15$  dB, soit  $-10$  dB en dessous du pic de puissance.

Ce paramètre est fonction de l'architecture (design) adoptée pour concevoir un composant DWDM.

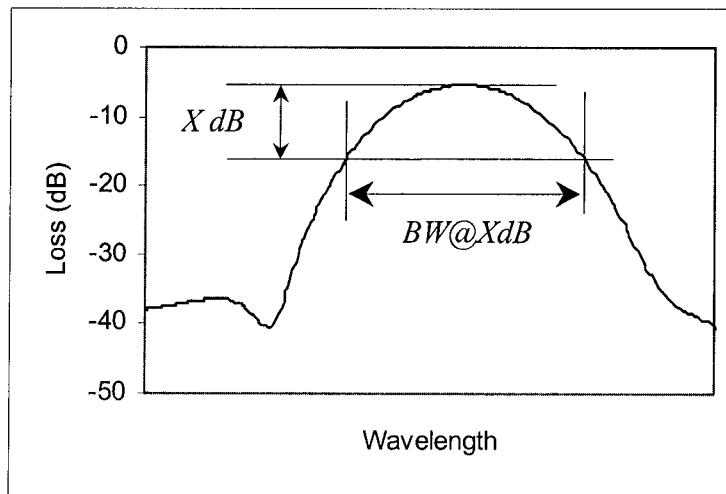
On choisit généralement d'évaluer la largeur de bande à  $-1$  dB,  $-3$  dB,  $-10$  dB et  $-20$  dB, la largeur de bande à  $20$  dB donnant notamment de précieuses informations sur l'allure

générale de la caractéristique (pente à gauche et à droite) et sur la diaphonie. Les deux principaux intérêts de mesurer ce paramètre sont:

1-elle permet d'identifier la largeur spectrale au-delà de la quelle la perte dans le dispositif est acceptable pour des applications de transmission. Elle est dans ce cas comparé à la bande passante du dispositif et définie aux alentours de (-) 1 dB.

2- elle permet de définir l'allure générale de la distribution de la puissance optique sur l'intervalle, en longueur d'onde, qu'elle occupe: les pentes de chaque coté. Etc.... ceci permettra d'estimer rapidement la valeur de l'isolation ou de la diaphonie.

La figure ci dessous montre la largeur de bande est mesurée dans le cas de idéal de la réponse optique d'un canal d'un DWDM.



**Figure B-7 :** Largeur de bande dans le cas d'une réponse optique idéal.

#### Comment mesure-t-on ce paramètre?

La largeur de bande (calculée par la macro, toujours à partir de la caractéristique relevée avec l'OSA) est calculée à partir de la détermination du maximum de puissance pour chaque canal : à partir de la valeur obtenue pour le pic, la macro déduit (de la puissance désignée) 1dB, 3dB, 10dB ou 20 dB selon les spécifications utilisées. Elle enregistre alors les longueurs d'onde correspondantes à chacune de ses puissances calculées et effectue une différence deux à deux de celles-ci, pour une «atténuation» donnée. On obtient alors une largeur de bande de ' $\lambda_1 - \lambda_2$ ' nanomètres à «x» dB.

## B-5-9 Diaphonie (*Crosstalk, XT*) et isolation (*AXT*)

Il existe normalement, entre ces deux termes, une légère différence : l'isolation tend à ne prendre en compte que les canaux adjacents et la diaphonie est plus utilisée pour considérer l'influence de l'ensemble des canaux.

Cependant, les termes « diaphonie » et « isolation » (pour un canal considéré) sont souvent indifféremment utilisés pour caractériser un composant *DWDM* à sorties multiple, et l'on rencontre parfois des définitions différentes.

### B-5-9-1 Diaphonie

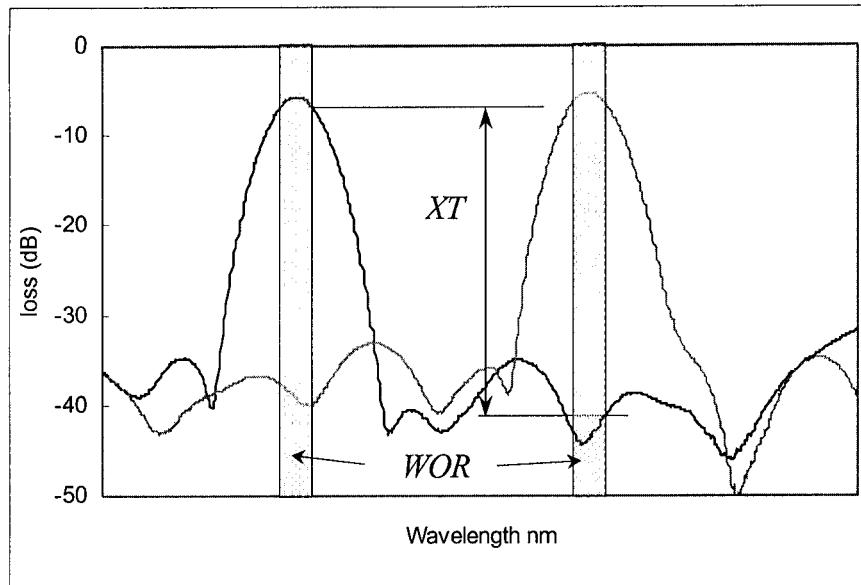
Pour un canal, ce paramètre quantifie donc la quantité de puissance que celui-ci reçoit des canaux qui lui sont adjacents (adjacent crosstalk), une variante tendant à considérer l'influence de l'ensemble des autres canaux (non-adjacents) c'est la diaphonie maximale (maximum crosstalk). (Voir la **figure B-8**).

Une description graphique d'une des pires situations :

La diaphonie adjacente du canal Y sur le canal X, c'est la différence entre la puissance « $P_{max}-1 \text{ dB}$ » (perte d'insertion minimale  $-1 \text{ dB}$ ) du canal Y et la puissance maximale, sur ce même canal (Y), relevée dans la largeur de bande à  $1 \text{ dB}$  du canal adjacent X

Dans le cas de la diaphonie maximale, on doit considérer l'ensemble des sorties du composant *DWDM*, et tenir compte de l'importance de la puissance du canal considéré dans leurs largeurs de bande.

Étant donné que pour chacun des canaux n'étant pas situés aux extrémités du spectre il est possible d'établir 2 valeurs pour la diaphonie adjacente, on donne en général, pour le canal étudié, la plus basse des valeurs calculées : c'est le plus mauvais cas des diaphonies que l'on retient.



**Figure B-8 :** Définition de la diphonie.

### B-5-9-2 Isolation

Par définition l'isolation d'un canal  $i$  est la somme des diaphonies de tous les autres canaux:

$$TXT = -10 \log \left[ \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N 10^{-XT_j/10} \right] \quad \text{B-2}$$

$XT_j$  est la diaphonie de canal  $j$  et  $N$  est le nombre de canaux.

Ce paramètre ne prend donc en considération que les canaux adjacents et correspond à la différence entre la puissance maximale du canal étudié (Y) et la puissance de celui-ci à la longueur d'onde (la plus proche de Y) correspondant à la puissance « $P_{max} - 1dB$ » du canal X.

#### Comment mesure-t-on ces paramètres?

La macro respecte exactement la définition écrite et l'explication graphique de ces deux paramètres à partir du spectre final des sorties du composant DWDM, calculant les pertes d'insertion, les puissances à 1 dB, puis les longueurs d'ondes correspondantes, les largeurs de bandes, etc....

### B-5-10 Variation de puissance due à la dépendance du composant à la polarisation de la lumière injectée (PDL)

La mesure de la *PDL* nous permet d'évaluer l'importance de la variation de puissance à la sortie du dispositif en fonction de l'état de polarisation du signal optique entrant dans celui-ci. Communément, ce paramètre est exprimé en *dB* et, ajouté à la valeur de la perte d'insertion déterminée pour le canal en question, on obtient l'intervalle dans lequel se situe la puissance récupérable à la sortie:

$$\text{Perte max. (dB)} = \text{Perte d'insertion (dB)} + \text{PDL (dB)} \quad \text{B-3}$$

Ce paramètre agit donc sur la valeur de la perte d'insertion mais aussi sur la valeur de la diaphonie de l'échantillon. On peut choisir d'effectuer cette mesure pour une longueur d'onde donnée ou pour un intervalle spectral choisi. Il est généralement du, dans le cas des composants en optique intégrée, à une dissymétrie dans la structure des guides d'ondes et les propriétés thermo-optiques des matériaux qui les constituent .

La **figure B-10** montre la fluctuation de la réponse optique en fonction de la polarisation.

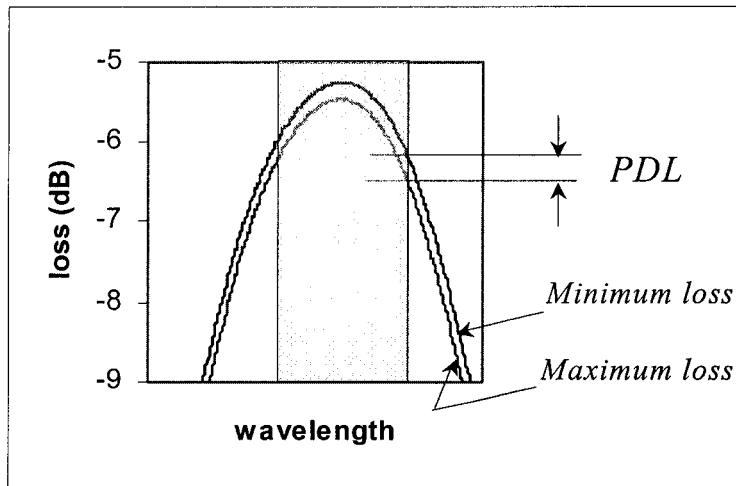
#### Comment mesure-t-on ce paramètre?

Ce paramètre est évalué en:

- injectant un signal exposé à tous les états de polarisations possibles dans le guide d'entrée du dispositif,
- relevant les valeurs du maximum et du minimum de puissance à la sortie en fonction de ces variations.

En test, nous utilisons notamment un contrôleur de polarisation, une fibre à maintien de polarisation, une source large bande et un analyseur de spectre optique et nous mettons en place le protocole de mesure comme décrit ci dessous. Il suffit alors, après avoir calculé la durée du test en fonction de la résolution choisie pour l'analyseur de spectre, de lancer un balayage rapide et aléatoire des états de polarisation grâce au contrôleur, pendant cette durée, et d'activer un affichage permanent du maximum et du minimum de puissance

déTECTée sur l'OSA pendant toute la mesure. La différence entre ces extreMums correspond à la valeur du *PDL*, en *dB* comme schématisé dans la figure ci dessous.



**Figure B-9 :** Fluctuation de la réponse optique en fonction de la polarisation.

#### B-5-11 Perte par réflexion de puissance vers la source (*Return loss*)

La perte par réflexion est, en première définition, la quantité (en *dB*) de puissance refléchie par rapport à la puissance incidente:

$$RL = -10 \log \left[ \frac{P_{reflected}}{P_{incident}} \right] \quad \text{B-4}$$

Dans un composant d'optique intégré, la zone de couplage entre les guides d'ondes et les fibres peut présenter ce problème de réflexions. Celles ci peuvent avoir deux origines différentes:

- Diffusion de Rayleigh: est un phénomène du à l'interaction entre l'énergie lumineuse transmise et les molécules qui constituent la fibre. Elle dépend du type de verre employé et elle est dépendante de la longueur d'onde.
- Réflexion de Fresnel qui se produit aux interfaces. Elle est due aux petits espaces d'air ou à des indices de réfraction non adaptés.

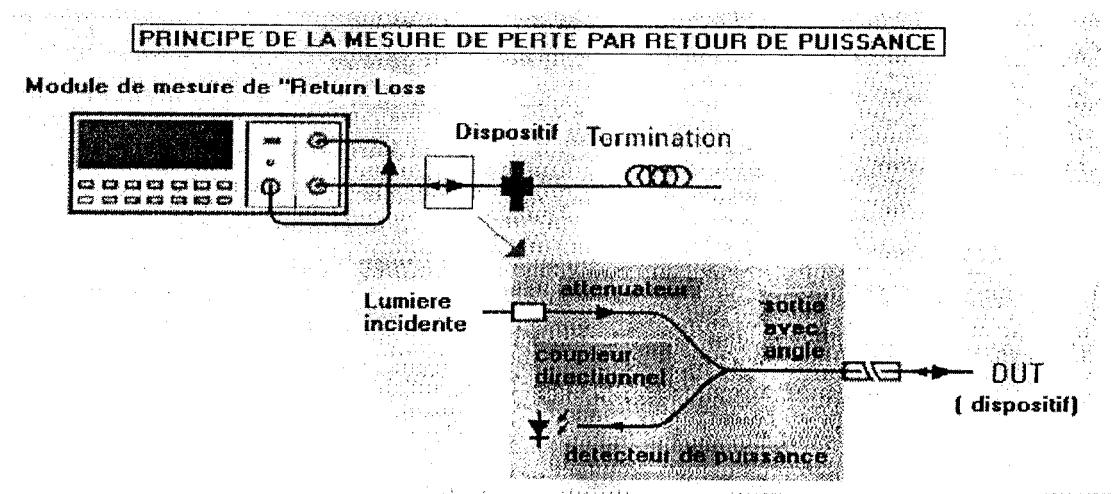
Cette puissance optique réfléchie est indésirable pour plusieurs raisons:

- 1- elle contribue notamment à la perte de puissance totale.
  - 2- les émetteurs lasers employés pour la caractérisation des composants DWDM sont très sensibles à cette lumière réfléchie : cela peut engendrer une dégradation de la stabilité et du niveau signal / bruit de ces lasers, voire les endommager irrémédiablement.
- Selon les définitions les plus courantes, cette valeur de perte par réflexion est une valeur positive. Quoiqu'il en soit, on doit comprendre que plus cette valeur est importante, moins la puissance réfléchie l'est et donc plus la performance du composant est bonne.

#### Comment mesure-t-on ces paramètres?

Une méthode standard, pour mesurer ce paramètre, dont le montage est montré dans la **figure B-10**, comprend l'utilisation:

- d'une source (laser accordable)
- d'un coupleur
- d'un photodétecteur pour mesurer la puissance réfléchie.



**Figure B-10 :** le montage utilisé pour la mesure de perte due au retour de puissance

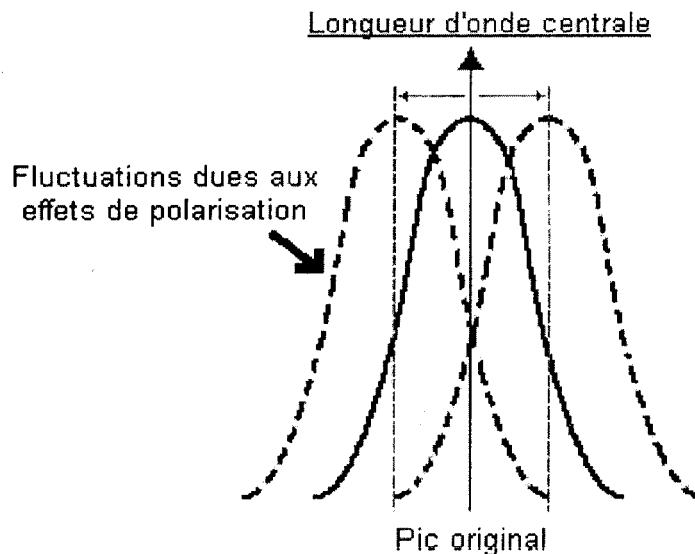
#### **B-5-12 dépendance de la longueur d'onde centrale à la polarisation**

Ce paramètre comme son nom l'indique, traduit la variation de la longueur d'onde centrale d'un canal en fonction de l'état de polarisation de l'énergie optique injecté à l'entrée du dispositif: il correspond à la distance (en nm) séparant les longueurs d'onde

centrales des gaussiennes de puissance les plus décalées à cause des effets de polarisation comme schématisé dans la **figure B-11**

Ce paramètre est très important pour celui qui conçoit le design du système car l'état de polarisation de la lumière véhiculée ne peut pas être contrôlé en permanence dans un réseau et malheureusement sa variation tend à réduire, notamment, la largeur de bande à  $(-1) dB$ .

Pour éviter une importante augmentation des pertes, ces variations extrêmes en longueur d'onde doivent, dans tous les cas, restées dans l'intervalle qui correspond à la bande passante.



**Figure B-11 :** Dépendance de la longueur d'onde centrale à la polarisation.

#### Comment mesure-t-on ces paramètres?

On effectue, comme précédemment, un balayage aléatoire de l'ensemble des états de polarisation avec le contrôleur (de polarisation) et on enregistre les fluctuations extrêmes du spectre à la sortie.

En les superposant à la caractéristique d'origine (sans test *PDL*...) obtenue en première caractérisation. Il est alors possible de constater s'il y a effectivement une influence de la polarisation sur la stabilité de la longueur d'onde centrale du canal étudié.

### B-5-13 Dépendance de la largeur de bande à la polarisation

Ce paramètre correspond au même type d'étude que précédemment mais on examine ici la variation de la largeur de bande en fonction des différents états de polarisation. Il est égal à  $BP2 - BP1$ .

## Comment mesure-t-on ces paramètres?

Nous suivons le même principe que celui de l'étude précédente.

## B-6 Conclusion

Tous ces paramètres sont évalués afin de s'assurer que les dispositifs correspondent aux spécifications qui ont été définies au moment du design, ces spécifications devant être en accord avec celles définies par l'Union Internationale des Télécommunications.

**Tableau B-1** : Exemple de Spécification d'un dispositif DWDM.