

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

BADJI MOKHTAR-ANNABAUNIVERSITY
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR-ANNABA



جامعة باجي مختار-عنابة

Faculté : TECHNOLOGIE

Département : Electronique

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Télécommunications

Spécialité : Systèmes des Télécommunications

MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de MASTER

Thème :

Modélisation d'un AWG pour le multiplexage dense par répartition en longueur d'ondes

Présenté PAR : *KHADRAOUI Oualid ET TRIKI Imed*

Encadrant : *BRIK Fatima*

Jury de Soutenance :

BOULMAIZ Amira	M.C.A	UBMA	Présidente
BRIK Fatima	M.C.A	UBMA	Encadrant
MESSADEG Djamil	Professeur	UBMA	Examineur

Année Universitaire : 2022 / 2023

REMERCIEMENT

Nous remercions **DIEU** qui nous a donné naissance, santé et plénitude de nos sens, et qui nous a guidés dans le chemin du savoir et de la science

Merci... 


Nous tenons à remercier notre encadreur madame *BRIK Fatima* pour avoir accepté de diriger ce mémoire de master avec sérénité, patience et objectivité, qu'elle trouve ici l'expression de notre reconnaissance et sincères gratitude pour leur encouragement et précieux conseils.

Merci... 


Nous tenons à remercier vivement les membres de jury madame *BOULMAIZ Amira, Maître de conférence à l'université BMA* et Monsieur *MESSADEG Djamil, Professeur à l'université BMA* pour l'honneur qu'ils nous ont fait d'avoir accepté de juger ce mémoire.

Merci ... 


Pour conclure, nous remercions toutes les personnes qui nous ont apporté de l'aide, que ce soit de près et de loin.

IMED & OUALID

Dédicace

À ma famille, mes proches et mon binôme Imed,

Merci pour votre soutien précieux.

Avec gratitude,

Oualid

Dédicace

Je dédie ce modeste travail

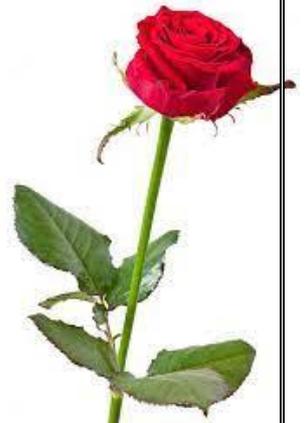
A ma grande et petite famille et plus particulièrement ma
femme qui m'a toujours encouragé et m'a aidé au cours de
mes études

A mes amis et mes proches

Sans oublier mon binôme Oualid

A tous ceux qui m'ont aidé de loin ou de près
durant les moments difficiles.

Imed



Abstract

Our work concerns the study and simulation of a phasar or AWG : (Arrayed Waveguide Grating), designed for optical multiplexing-demultiplexing of signals widely used in WDM (Wavelength Division Multiplexing) networks.

After revealing the operating principle of this phasar and its applications in multiplexed optical networks, we simulated a model of an AWG in integrated optics, using the 'WDM router' simulator in BeamProb software.

The simulation results obtained enabled us to implement a model of a 16-channel AWG operating at the third window of 1550nm optical transmissions, with low insertion and crosstalk losses, and with a 100GHz spacing compatible with dense multiplexing (DWDM) applications.

Key words :AWG, WDM, Phasar, BeamProb.

ملخص

يركز عملنا على دراسة ومحاكاة مراحل AWG: (Arrayed Waveguide Grating)، المصممة لتعدد الإرسال الضوئي

وإزالة تعدد الإرسال للإشارات المستخدمة على نطاق واسع في شبكات WDM

(Wavelength Division Multiplexing)

بعد الكشف عن مبدأ تشغيل هذه المرحلة وتطبيقاتها في الشبكات الضوئية متعددة الإرسال، قمنا بمحاكاة نموذج AWG في

البصريات المتكاملة التي تم إنشاؤها عبر محاكي "جهاز توجيه" WDM لبرنامج BeamProb

أُتاحت نتائج المحاكاة التي تم الحصول عليها بتنفيذ نموذج AWG من 16 قناة تعمل في النافذة الثالثة للإرسال البصري

1550 نانومتر ، مع انخفاض خسائر الإدراج والتداخل ، وتبعد 100 جيجا هرتز متوافق مع تطبيقات تعدد الإرسال كثيفة

(DWDM).

الكلمات الرئيسية: BeamProb ، Phasar ، WDM ، AWG

Résumé

Notre travail porte sur l'étude et la simulation d'un phasar ou AWG : (Arrayed Waveguide Grating), destiné au multiplexage- démultiplexage optiques des signaux largement utilisé dans les réseaux WDM (Wavelength Division Multiplexing).

Après avoir révélé le principe de fonctionnement de ce phasar et ses applications dans les réseaux optiques multiplexés, nous avons simulé un modèle d'un AWG en optique intégrée établis via le simulateur 'WDM router' du logiciel BeamProb.

Les résultats de simulation obtenus ont permis de mettre en œuvre un modèle d'un AWG à 16 canaux fonctionnant à la troisième fenêtre des transmissions optiques 1550nm, avec des pertes d'insertion et de diaphonie faibles, et ayant un espacement de 100GHz compatible aux applications du multiplexage dense (DWDM).

Mots clés : AWG, WDM, Phasar, BeamProb.

LISTE DES FIGURES

Figure	Désignation	page
Chapitre I : Etat de l'art sur les multiplexeurs-démultiplexeurs optiques.		
Figure I.1	Répartition des sous-bandes dans le cas d'un multiplexage WDM.	3
Figure I.2	Transmission de données optiques effectuée avec chacune une fréquence propre.	4
Figure I.3	Schéma de principe du multiplexage WDM dans les communications par fibre (avec 4 longueurs d'ondes).	4
Figure I.4	Principes de la CWDM - Jusqu'à 18 longueurs d'onde CWDM différentes sur une seule paire de fibres.	6
Figure I.5	Bandes de transmission optique.	7
Figure I.6	Système DWDM avec la transmission de signaux optiques à travers une seule fibre à différentes longueurs d'ondes.	8
Figure I.7	Schéma du coupleur directionnel.	9
Figure I.8	Coupleurs Y en MUX/DEMUX.	9
Figure I.9	Principe de fonctionnement du multiplexage en longueur d'onde des réseaux de Bragg.	10
Figure I.10	Schéma d'un filtre à couches minces avec trois ports.	11
Figure I.11	Principe d'un démultiplexage par diffraction dans un réseau optique.	12
Figure I.12	Configuration d'un démultiplexeur basé sur un réseau d'avec une combinaison de deux matériaux d'indices n et N présentant la même valeur de dispersion.	12
Figure I.13	Démultiplexeur optique d'un coupleur en étoile.	13
Figure I.14	Étapes de transformation du faisceau dans le démultiplexeur.	14
Figure I.15	Définition de diaphonie.	15
Chapitre II: Design D'un AWG (Arrayed Waveguide Grating) sous BeamProp.		
Figure II.1	Structure typique d'un phasar.	18
Figure II.2	Structure du coupleur d'entrée.	19
Figure II.3	Géométrie du cercle de Rowland.	20
Figure II.4	Conception basique du coupleur en étoile (FPR).	23
Figure II.5	Forme du guide d'onde AWG sous BeamProp.	24

Figure II.6	Exemples de méthodes de disposition pour les guides d'ondes en réseau.	26
Figure II.7	Structure du coupleur de sortie.	25
Figure II.8	Ouverture du menu WDM Router Layout sur BeamPROP .	26
Figure II.9	Boite de dialogue WDM Router Layout.	27
Figure II.10	Coupleur en étoile Entrée.	28
Figure II.11	Coupleur en étoile Sortie.	29
Figure II.12	Structure typique d'un multiplexeur AWG sur BeamProP.	29
Figure II.13	Ouverture du menu WDM Router Simulation sur BeamPROP.	30
Figure II.14	Boite de dialogue pour choisir l'entrée du coupleur en étoile à simuler.	30
Figure II.15	Boite de dialogue WDM Router générateur de fichiers de script.	31
Figure II.16	Boite de dialogue Script File dans le menu BeamPROP.	32
Figure II.17	Sélection du fichier de script à exécuter depuis BeamPROP.	32
Chapitre III : Résultats de simulation et interprétations.		
Figure III.1	Résultats de simulation obtenue pour un nombre de guide de 40 a) Spectre de sortie. b) Répartition du champ.	35
Figure III.2	Résultats de simulation obtenue pour un nombre de guide de 80. a) Spectre de sortie. b) Répartition du champ	36
Figure III.3	Résultats de simulation obtenue pour un nombre de guide de 100. a) Spectre de sortie. b) Répartition du champ	37
Figure III.4	Variation des pertes d'insertion en fonction du nombre de guide d'ondes.	40
Figure III.5	Résultats de simulation obtenue pour un nombre de guide de 60. a) Spectre de sortie. b) Répartition du champ	42
Figure III.6	Résultats de simulation obtenue pour un nombre de guide de 100 a) Spectre de sortie. b) Répartition du champ.	43

Figure III.7	Résultats de simulation obtenue pour un nombre de guide de 120. a) Spectre de sortie. b) Répartition du champ	44
---------------------	---	-----------

LISTE DES TABLEAUX

Tableau	Désignation	page
Chapitre I: Etat de l'art sur les multiplexeurs-démultiplexeurs optiques.		
Tableau I.1	Comparaison des caractéristiques entre les différentes techniques WDM	6
Chapitre II: Design D'un AWG (Arrayed Waveguide Grating) sous BeamProb.		
Tableau II.1	Paramètres spécifiques des coupleurs et ceux qui définissent les caractéristiques du AWG.	26
Chapitre III: Résultats de simulation et interprétations.		
Tableau III.1	Résultats de simulation calculés d'un AWG à 16 canaux et 8nm d'espacement pour plusieurs valeurs du nombre de guides dans le réseau de phase	38
Tableau III.2	Paramètres caractéristiques d'un AWG à 16 canaux pour plusieurs valeurs du nombre de guides dans le réseau de phase	39
Tableau III.3	Résultats de simulation calculés d'un AWG à 32 canaux et 4nm d'espacement pour 60,100 et 120 guides dans le réseau de phase.	45
Tableau III.4	Paramètres caractéristiques d'un AWG à 32 canaux pour plusieurs valeurs du nombre de guides du réseau déphaseur.	46

Liste des Symboles

Symbole	Désignation
λ_0	Longueur d'onde centrale
λ	Longueur d'onde
$\Delta\lambda_0$	$\Delta\lambda_0$ La séparation spectrale entre canaux
L_0	les pertes d'insertion
D_j	la diaphonie totale
C	Vitesse de la lumière dans le vide
N_{eff}	Indice de réfraction effectif de cœur
Λ	Période du réseau
Λ_b	Longueur d'onde de Bragg
A	Angle central du coupleur en étoile par rapport à l'axe z
A_0	α_0 Paramètre de conception/interne (angle du guide d'onde le plus interne dans le réseau)
A_i	$(D_i/R_i)(180/\pi)$ Angle interne (angle sous-tendu par D_i)
A_o	$(D_o/R_o)(180/\pi)$ Angle interne (angle sous-tendu par D_o)
A_{sa}	$(M+1)/2 - A/A_0$ Angle interne de l'axe du coupleur au guide d'onde le plus interne dans le réseau
A_{si}	$(N+1)/2 + A/A_i$ Angle interne de l'axe du coupleur au premier guide d'onde d'entrée
A_{so}	$(N_{out}+1)/2 + A/A_i$ Angle interne de l'axe du coupleur au premier guide d'onde de sortie
B	$(L_g - R_z * (\sin(A_0) - \rho \cos(A_0))) / \cos(A_0) - (R_{end} + \rho A_0)$ Paramètre interne (géométrique)
C	$0.5DL(R_o/D_o)$ Paramètre interne (géométrique)
CC	$C - R_z$ Paramètre interne (géométrique)

DL	GratingOrderLambda0/Nguide différence de chemin optique entre les bras du réseau de diffraction
Di	Espacement des guides d'onde à cercle d'entrée
Do	Espacement des guides d'onde à cercle de sortie
Dz	Déplacement des foyers par rapport à la construction standard de Rowland
Lextra	Longueur supplémentaire utilisée dans Lg et peut être ajustée si nécessaire pour générer une disposition fonctionnelle
Lg	Lextra+Rendcos(A0)+Rzsin(A0) paramètre interne (demi-longueur du réseau de guides d'onde)
Li	2Lit longueur du guide d'onde d'entrée (incl. taper)
Lim	(Wit/2)tan(zAi8)+1 paramètre interne (géométrique)
Lin	longueur de la section d'entrée sur la disposition complète
Lit	longueur du taper d'entrée
Lo	2Lot longueur du guide d'onde de sortie (incl. taper)
Lom	(Wot/2)tan(zAo80)+1 paramètre interne (géométrique)
Lot	longueur du taper de sortie
Lsep	Ri+Dz sep entre les centres des cercles de Rowland
Lstar	(Ri+Ro)-(Sagi+Sago)-Lsep longueur de la partie droite du corps du coupleur
M	nombre de guides d'onde dans le réseau
Marray	Wspan/Do nombre de guides d'onde dans le réseau
N	Le nombre de ports d'entrée
N0	Design_background_index paramètre de conception (indice de réfraction de fond)
Nchan	Nombre de canaux en longueur d'onde

Nguide	Indice effectif du guide d'onde
Nout	Le nombre de ports de sortie
Ri	$R_o/2$ rayon du cercle de Rowland le plus interne
Rin	Rayon des courbures des guides d'onde d'entrée
Ro	$(N_{slab}/GratingOrder)((D_i D_o)/D_{\lambda})$ rayon du cercle de Rowland externe (longueur de la région en étoile) ($D_z=0$)
Rz	Rayon de la première courbure des guides d'onde en réseau
W	Largeur du guide d'onde (non effilé)
Wim	$W+(W_{it}-W)(L_{it}+L_{im})/L_{it}$ paramètre interne (géométrique)
Wit	$2W$ largeur du guide d'onde au cercle d'entrée
Wom	$W+(W_{ot}-W)(L_{ot}+L_{im})/L_{ot}$ paramètre interne (géométrique)

Liste des abréviations

Symbole	Désignation
AWG	Arrayed Waveguide Grating
CWDM	Coarse Wavelength Division Multiplexing
DWDM	Dense Wavelength Division Multiplexing
FBG	Fiber Bragg Grating
FRP	Free Resolved Period
FPR	Free Propagation Region
FSR	Free Spectral Range
ITU	International Telecommunication Union
TFF	Thin Film Filter
UDWDM	Ultra Dense Wavelength Division Multiplexing
WDM	Wavelength Division Multiplexing

SOMMAIRE

Introduction générale	1
<i>Chapitre I : Etat de l'art sur les multiplexeurs-démultiplexeurs optiques</i>	
I.1. Introduction	3
I.2. Principe de la technique WDM	3
I.2.1. Principe.....	3
I.2.2. Description.....	4
I.3. Les différents types de WDM	5
I.3.1. Le CWDM.....	6
I.3.2. Le DWDM.....	6
I.3.3. Le UDWDM.....	8
I.4. Etat de l'art sur les Mux/démux optiques	8
I.4.1. Mux/démux à coupleurs	8
I.4.2. Mux/Démux par filtre de Bragg (FBG).....	10
I.4.3. Mux/Démux par filtres interférentiels en couche mince (TFF).....	11
I.4.4. Mux/Démux par diffraction.....	11
I.4.5. Mux/Démux PHASAR (AWG).....	13
I.5. Présentation de l'AWG	13
I.5.1. Principe général de fonctionnement d'un PHASAR	13
I.5.2. Caractéristiques des PHASAR	14
I.6. Conclusion	16
<i>Chapitre II : Design d'un AWG (ArrayedWave Guide) pour le WDM sous BeamProb</i>	
II.1. Introduction	17
II.2. Présentation du simulateur “ BeamPROP”	17
II.2.1. Description de la méthode utilisée pour la simulation.....	17
II.3. Design d'un AWG sous BeamProP	18
II.3.1. Le coupleur d'entrée.....	18
II.3.2. Conception du coupleur en étoile dans un AWG.....	23
II.3.3. Le réseau des guides d'onde dans un AWG.....	23
II.3.4. Le coupleur de sortie.....	24

II.4. Paramètres du phasar AWG	25
II.5. Etapes à suivre lors de la conception du design	26
II.5.1. L'utilitaire de simulation du routeur WDM (WDM Router Simulation Utility)...	30
II.5.2. Exécution de la simulation	32
II.6. Conclusion	33
<i>Chapitre III : Résultats de simulation et interprétations.</i>	
III.1. Introduction	34
III.2. Présentation des résultats de simulation	34
III.2.1. Simulation d'un Phasar16 canaux	34
III.2.2. Simulation d'un phasar 32 canaux	41
Conclusion générale	47
Bibliographie	49

Introduction générale

Le multiplexage en longueur d'onde WDM (Wavelength Division Multiplexing), est une technique largement employée pour mettre à profit la bande passante des fibres optiques. Dans cette technique, une seule fibre optique suffit pour transmettre plusieurs signaux issus de différentes sources optiques.

L'avantage donc du WDM, est qu'il permet de multiplier considérablement la capacité de transmission des réseaux optiques, sans avoir à poser de nouvelles fibres optiques.

La mise en œuvre de la technologie WDM nécessite différents composants optiques, notamment : les multiplexeurs et les démultiplexeurs.

On appelle Multiplexeur le composant qui permet d'injecter sur la même ligne plusieurs signaux de différentes longueurs d'onde. La séparation des signaux est effectuée à l'autre extrémité de la ligne par un démultiplexeur.

Parmi les principales méthodes sur lesquelles reposent actuellement les multiplexeurs et les démultiplexeurs à usage commercial, on cite : les réseaux de diffraction, les filtres interférentiels à couche mince, les fibres à réseaux de Bragg et les réseaux de phase (PHASAR). Le phasar ou AWG (Arrayed Wave guide Grating) est l'un des composants d'optique intégrée le plus utilisé dans les réseaux de communication à fibres optiques. Ce dispositif offre des fonctionnalités avancées telles que le multiplexage et le démultiplexage des signaux optiques à des longueurs d'onde spécifiques, permettant ainsi une transmission efficace de données sur des fibres optiques.

Il est utilisé soit pour multiplexer, soit pour démultiplexeur les signaux optiques. L'AWG est composé de trois parties : le coupleur d'entrée, le réseau de phase et le coupleur de sortie.

Notre travail s'est focalisé sur l'étude et la modélisation d'un AWG destiné aux réseaux DWDM (le multiplexage dense).

A cet effet, nous avons entrepris la simulation des Phasars 16 et 32 canaux, et ceci grâce au module intégré du RsoftCAD : WDM Router, qui est basé sur la méthode de propagation de faisceau (BPM), ce module permet également la simulation de la géométrie des coupleurs d'entrée et de sortie du phasar.

Dans ce contexte, ce mémoire a été organisé en trois chapitres, qui peuvent être résumés comme suit :

Le premier chapitre consiste en une étude de l'état de l'art des multiplexeurs – démultiplexeurs optiques. Des définitions sur l'architecture du PHASAR, son principe de fonctionnement et ses différentes caractéristiques ont été également abordées.

Dans le deuxième chapitre, à l'aide du simulateur BeamProb, nous présentons le design de l'AWG conçu via l'utilitaire WDM Router, ainsi que les différentes étapes à suivre pour la simulation.

Le troisième chapitre a été consacré aux résultats de simulation obtenus, en déduisant les paramètres caractéristiques des phasars conçus, notamment les pertes d'insertion, l'espacement entre canaux et la diaphonie.

Enfin, à partir des conclusions partielles tirées des trois chapitres, nous avons pu établir une conclusion générale résumant l'ensemble du travail effectué.

Chapitre 9 :
Multiplexeurs :

Etat De L'art Sur Les
Multiplexeurs

Multiplexeurs-
Multiplexeurs

Démultiplexeurs optiques
Démultiplexeurs optiques

I.1. Introduction

Ce chapitre a pour objectif la mise en valeur du potentiel des multiplexeurs-démultiplexeurs optiques à travers la présentation d'un ensemble de notions et de définitions.

D'abord, nous abordons le principe fondamental de la technique de multiplexage en longueur d'onde (WDM) et nous explorons les différents types de WDM disponibles. Par la suite, nous énumérons les principales structures des multiplexeurs et démultiplexeurs optiques. L'accent sera ensuite mis sur le AWG (Arrayed Wave Guide), son principe de fonctionnement et ses principales caractéristiques.

I.2. Principe de la technique WDM

I.2.1. Principe

Le multiplexage en longueur d'onde WDM (Wavelength Division Multiplexing), consiste à envoyer dans une seule fibre N porteuses optiques à différentes longueurs d'onde transmettant chacune un débit D_b . Ce n'est plus l'axe du temps qui est découpé en périodes pour chaque utilisateur mais la bande passante. Et chaque sous-bande est affectée à une voie Figure (I.1). Ainsi plusieurs transmissions peuvent être faites simultanément, chacune sur une bande de fréquences particulières Figure(I.2). Ce procédé est encore appelé multiplexage en fréquence (Frequency Division Multiplexing, FDM) vu que $\lambda=c/f$. Ces deux termes recouvrent la même notion, mais par habitude, on parle de multiplexage en longueur d'onde lorsque la séparation entre deux canaux est relativement grande (typiquement plus de 1 nm), tandis que l'on parle de multiplexage en fréquence lorsque cet écart est relativement petit. [1]. Le signal lumineux composé de toutes ces longueurs d'ondes va transiter sur la fibre, et le récepteur n'aura qu'à démultiplexer le signal pour obtenir les différents canaux de départ.

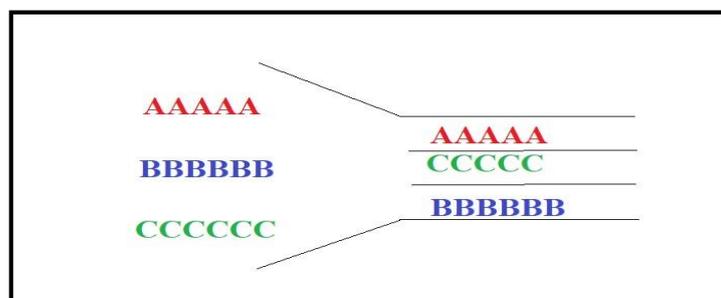


Figure I.1 : Répartition des sous-bandes dans le cas d'un multiplexage WDM [1].

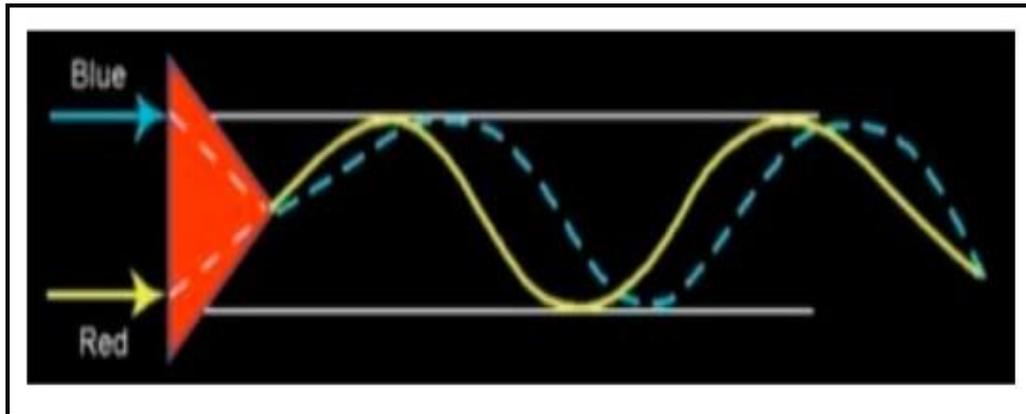


Figure I.2 : Transmission de données optiques effectuée avec chacune une fréquence propre [1].

I.2.2. Description

L'utilisation de la WDM nécessite des sources de lumière spécifiques appelées diodes laser. Ces diodes laser émettent des signaux à des longueurs d'onde différentes mais proches les unes des autres, généralement dans la plage des 1550 nm. Chaque diode laser est utilisée pour transporter un signal distinct. Les signaux provenant des diodes laser sont ensuite combinés à l'aide d'un multiplexeur optique, qui agit comme un dispositif de regroupement. [2]

La figure (I.3) représente un exemple d'une liaison par fibre optique utilisant le multiplexage WDM.

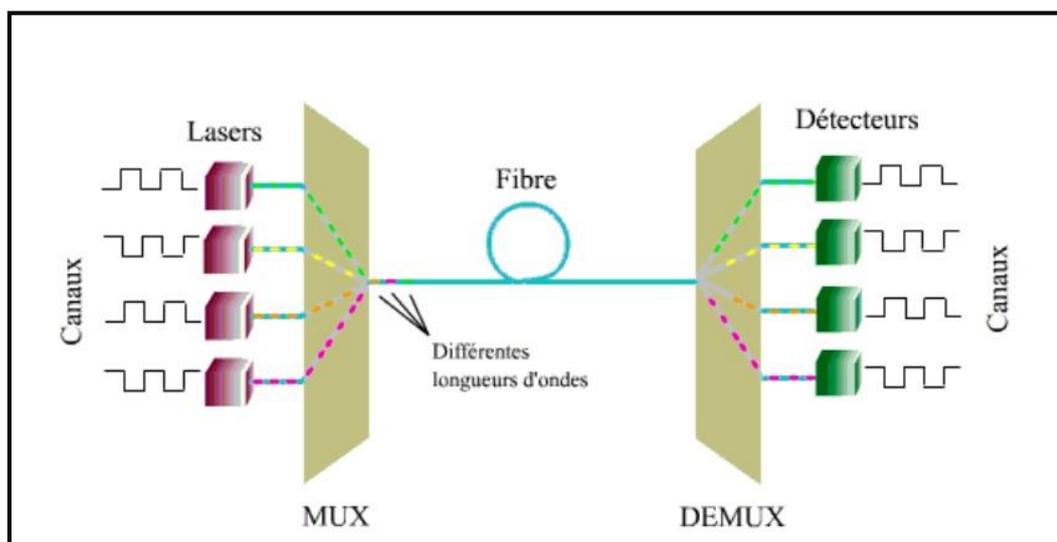


Figure I.3 : Schéma de principe du multiplexage WDM dans les communications par fibre (avec 4 longueurs d'ondes). [3]

Afin d'assurer une bonne qualité de transmission du multiplex dans la fibre, il est important de déterminer l'espacement minimum à respecter entre les longueurs d'onde émises par chacune des sources. Cette grandeur dépend de plusieurs paramètres :

- ❖ Qualité de la fibre
- ❖ Qualité des multiplexeur/démultiplexeur
- ❖ Longueur de transmission
- ❖ Qualité des sources
- ❖ Débit des données de chaque source

La fibre optique transporte alors un débit numérique égal à $N \times Db$. Cette dernière est souvent définie comme la capacité du système. [1]

I.3. Les différents types de WDM

Il existe plusieurs technologie WDM, Elles restent identiques par leur principe mais se différencient uniquement par le nombre de canaux exploité dans une fibre.

La technologie WDM est dite dense (D-WDM) lorsque l'espacement utilisé est égal ou inférieur à 100 GHz. Des systèmes à 50 GHz (0,4 nm) et à 25 GHz (0,2 nm) permettent d'obtenir respectivement 80 et 160 canaux optiques.

Pour des espacements encore plus faibles, on parlera d'U-WDM : Ultra - Dense Wavelength Division Multiplexing. Ainsi, des systèmes à 10 GHz (0,08) permettent d'obtenir 400 canaux optiques.

Les systèmes WDM / DWDM les plus commercialisés aujourd'hui comportent 8, 16, 32, 80 canaux optiques, ce qui permet d'atteindre des capacités de 80, 160, 320, 800 Gb/s en prenant un débit nominal de 10 Gb/s. On peut atteindre une capacité de 4 000 Gb/s (4 Tera b/s) avec 400 canaux optiques à 10 Gb/s, en technologie U-DWDM.

Le tableau (I.1) résume les modes les plus répandus.

Type de multiplexage	Espacement inter-canaux (nm)	Nombre de canaux	Bande de signaux (nm)
CWDM	20-15	8 jusqu'à 16	1270-1610
DWDM	0.4- 1.6	jusqu'à 160	1500-1600
UDWDM	0.08	> 400	1625-1675

Tableau I.1 : Comparaison des caractéristiques entre les différentes techniques WDM [4].

I.3.1. Le CWDM

Le CWDM pour (Coarse Wavelength Division Multiplexing) utilise des longueurs d'onde de 1270 à 1610 nm, respectivement espacées de 20 nm, 18canaux au maximum sont utilisables ; c'est une technologie moins coûteuse notamment utilisable pour les boucles locales (MAN). [5]

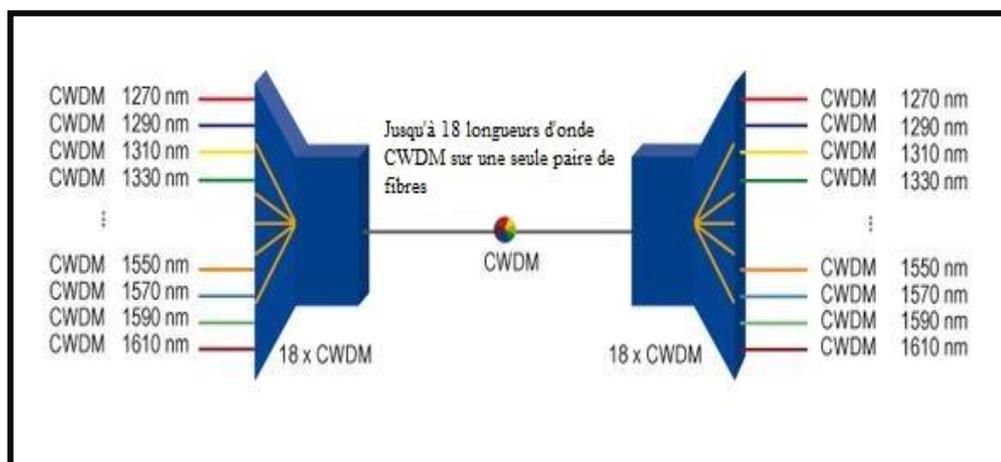


Figure I.4 : Principes de la CWDM - Jusqu'à 18 longueurs d'onde CWDM différentes sur une seule paire de fibres [6].

I.3.2. Le DWDM

Le DWDM pour (Dense Wavelength Division Multiplexing), est une technique de multiplexage qui permet de transmettre simultanément plusieurs signaux optiques sur différentes longueurs d'onde généralement inférieur à 1 nm et utilise des longueurs d'onde autour de 1550nm. La tranche de fréquence la plus utilisée est la bande C (Conventionnelle) : 191,560 à 195,942 THz (de 1 565 à 1 530 nm) Figure I.5.

La DWDM est généralement associée à des amplificateurs optiques tels que les amplificateurs à fibre dopée à l'erbium (EDFA) Figure (I.5). Ces amplificateurs amplifient tous les canaux optiques de manière simultanée, sans distorsion du signal utile.

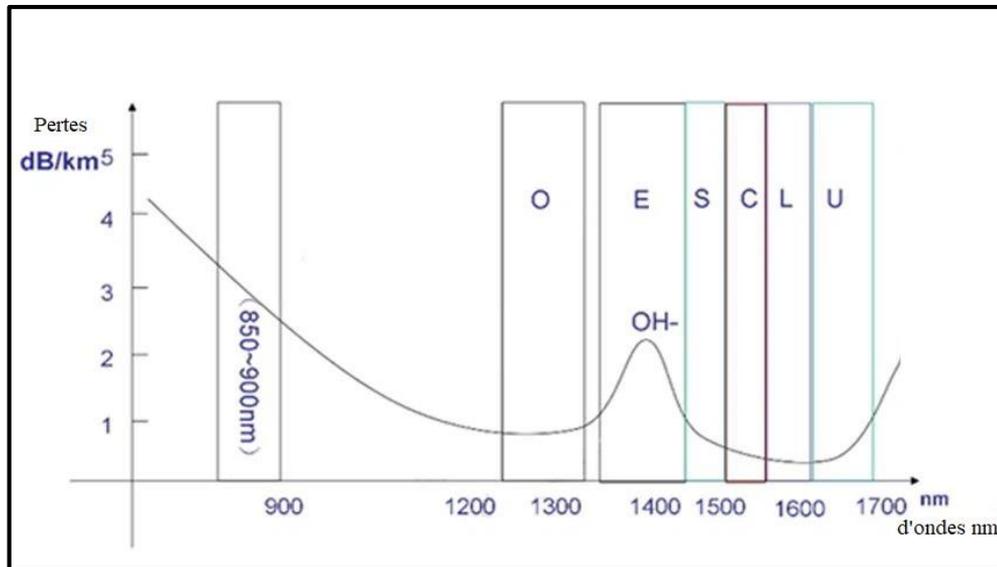


Figure I.5 : Bandes de transmission optique [7].

- **Bande de 850 nm** : est la longueur d'onde principale du système de communication de fibres
Multi modes, combinée avec le VCSEL (laser émetteur de surface de cavité verticale)
- **Bande O** : la bande originale de 1260 à 1360 nm
- **Bande E** : longueur d'onde étendue : 1360-1460 nm
- **Bande S** : bande à courte longueur d'onde : 1460-1530 nm, la bande S est utilisée autant de systèmes PON (réseau optique passif).
- **Bande C** : bande conventionnelle) varie de 1530 nm à 1565 nm et représente la bande conventionnelle. La fibre optique montre la plus faible perte en bande C et a un avantage significatif dans les systèmes de transmission longue distance
- **Bande L** : La bande L (bande longue longueur d'onde : 1565-1625 nm) est la deuxième bande de longueur d'onde la plus basse et est souvent utilisée lorsque la bande C n'est pas suffisante pour répondre aux besoins de bande passante.
- **Bande U** : bande ultra-longue : 1625-1675 nm elle est principalement utilisée pour la surveillance du réseau.

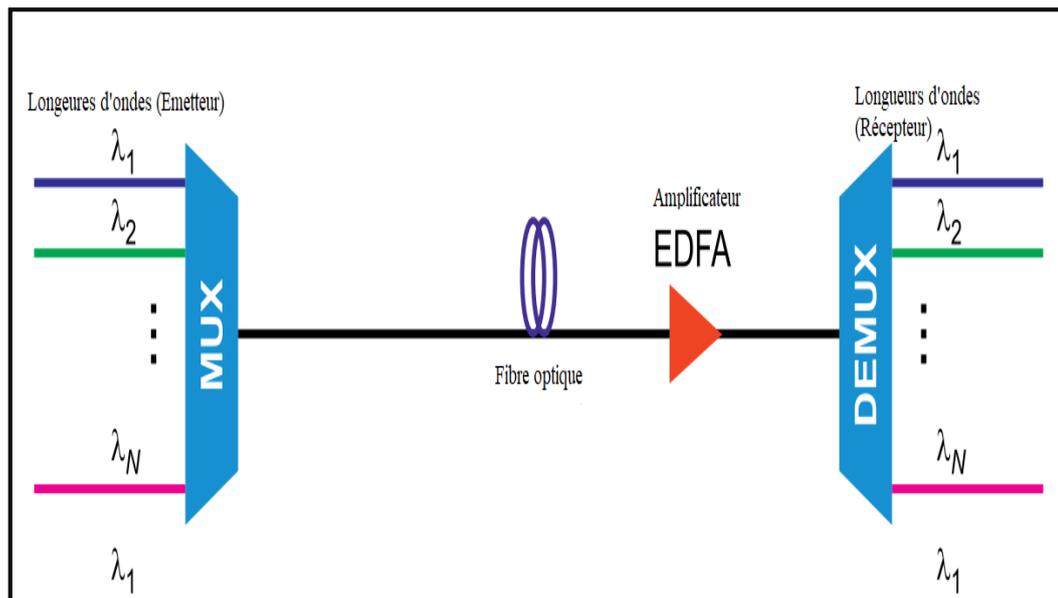


Figure I.6 : Système DWDM avec la transmission de signaux optiques à travers une seule fibre à différentes longueurs d'onde [8].

I.3.3. Le UDWDM

Le UDWDM pour (Ultra-Dense Wavelength Division Multiplexing) est une évolution du DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) avec un espacement encore plus réduit entre les longueurs d'onde, des systèmes à 10 GHz (0,08 nm) ce qui permet d'obtenir 400 canaux optiques Tableau (I.1).

I.4. Etat de l'art sur les Multiplexeurs/démultiplexeurs optiques

La technique WDM nécessite des multiplexeurs qui combine les signaux provenant des différentes sources et des démultiplexeurs à l'extrémité de la fibre pour puisse les séparer.

Parmi les technologies existantes pour réaliser des multiplexeurs et démultiplexeurs, nous citons : les coupleurs, les réseaux de diffraction, les réseaux de Bragg et les phasars (AWG).

I.4.1. Mux /démux à coupleurs

Les coupleurs directionnels peuvent être réalisés par fusion contrôlée de deux fibres en rapprochant les deux cœurs de quelques microns seulement, ce qui permet le couplage de deux guides. Figure (I .7).

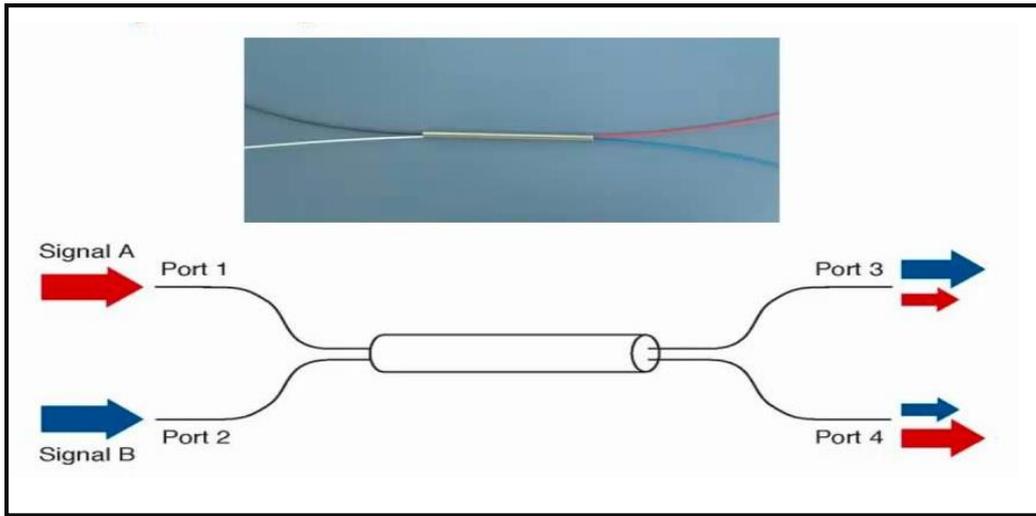


Figure I.7 : Schéma du coupleur directionnel [9].

On peut ainsi diviser un faisceau en deux ou coupler deux faisceaux. Les coupleurs directionnels sont utilisés dans divers fonctions tels que :

- ❖ Diviseur de puissance une des plus importantes applications du coupleur directionnel de fibre est la division de la puissance. Dans beaucoup d'applications, comme dans le réseau local ou le capteur de fibre optique, il est nécessaire de diviser ou de combiner les transmissions optiques.
- ❖ Diviseur de longueur d'onde multiplexeurs / démultiplexeurs.

Une autre application très importante d'un coupleur est la division de longueur d'onde multiplexeur / démultiplexeur. Figure (I.8).

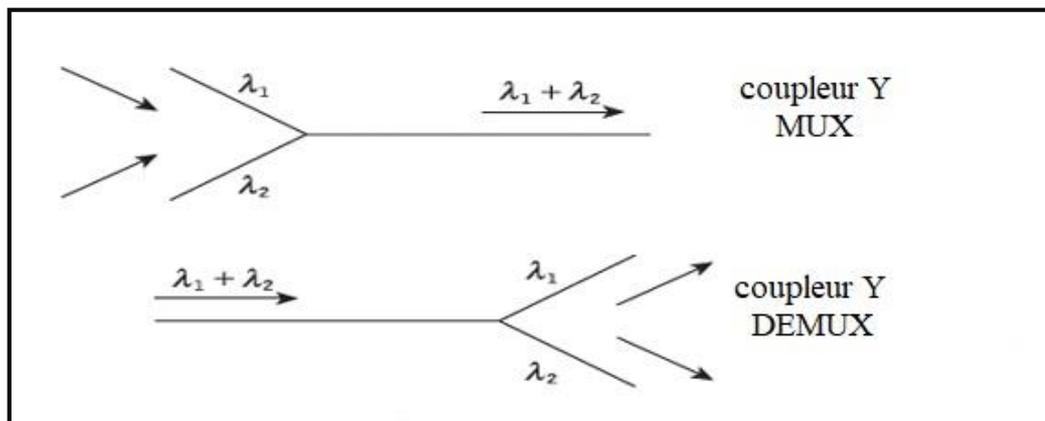


Figure I.8 : Coupleurs Y en MUX/DEMUX.

On utilise les coupleurs uniquement pour un petit nombre de canaux car les pertes sont considérables en $3N$ dB pour N canaux.

I.4.2. Mux/Démux par filtre de Bragg (FBG)

Un réseau de Bragg est une structure avec une perturbation périodique de l'indice de réfraction dans un guide d'ondes. Ces réseaux sont fabriqués en exposant le cœur d'une fibre SMF monomode à un rayonnement périodique de la lumière UV. Cette exposition induit un changement permanent de l'indice de réfraction dans le cœur de la fibre. [10]

Lorsqu'une lumière incidente atteint un changement périodique de l'indice de réfraction, une petite quantité de cette lumière est réfléchi à chaque point de transition. Cependant, lorsque ces réflexions interfèrent de manière constructive, toutes les ondes lumineuses réfléchies se combinent pour former une large gamme spectrale de réflexion à une longueur d'onde spécifique. Ce phénomène est connu sous le nom de condition de Bragg (I.1), et la longueur d'onde à laquelle la réflexion maximale se produit et appelée longueur d'onde de Bragg.

$$\lambda_b = 2n_{eff} \Lambda \quad (I.1)$$

ou : n_{eff} : est l'indice de réfraction effectif de cœur

λ_b : la longueur d'onde de Bragg

Λ : la période du réseau.

En conséquence, seules les longueurs d'onde qui satisfont à la condition de Bragg sont fortement réfléchies, tandis que les autres longueurs d'onde subissent une réflexion minimale. Cela permet au filtre à réseau de Bragg de sélectionner sélectivement une ou plusieurs longueurs d'ondes spécifiques et de les refléter intensément, tandis que les autres longueurs d'onde sont transmises ou réfléchies avec une moindre intensité.

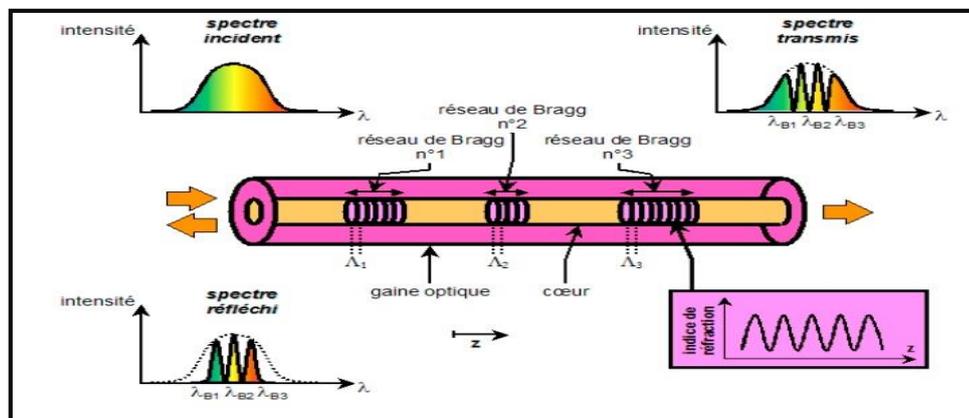


Figure I.9 : Principe de fonctionnement du multiplexage en longueur d'onde des réseaux de Bragg. [11]

I.4.3. Mux/Démux par filtres interférentiels en couche mince (TFF)

La divergence de la lumière à partir d'une fibre nécessite souvent l'utilisation des lentilles pour collimater la lumière dans des composants constitués de filtres à couches minces. Un schéma d'un filtre à couches minces avec trois ports est représenté Figure (I.10).

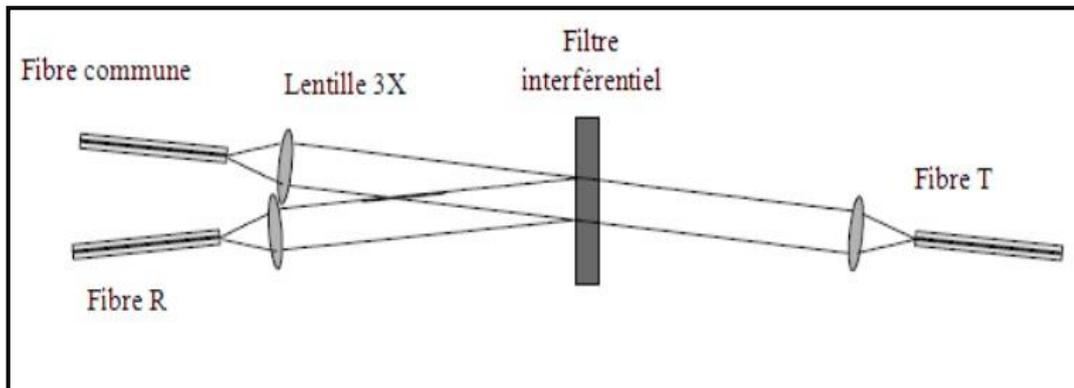


Figure I.10 : Schéma d'un filtre à couches minces avec trois ports. [10]

La lumière émergeant d'une fibre optique standard est collimatée à l'aide d'une première lentille et interagit ensuite avec un filtre interférentiel. La lumière qui est transmise à travers le filtre est couplée dans une fibre T à l'aide d'une autre lentille, tandis que la lumière qui est réfléchiée par le filtre est couplée dans une fibre R. Comme illustré dans la figure (1.10), ce dispositif permet de séparer deux bandes spectrales d'entrée, ce qui le rend fonctionner comme un démultiplexeur. Il est également possible d'utiliser ce dispositif avec une configuration inversée, ce qui lui permet de combiner deux bandes spectrales. Par conséquent, ce composant peut également fonctionner comme un multiplexeur.

I.4.4. Mux/Démux par diffraction

Un réseau de diffraction est une surface optique sur laquelle un nombre important de fentes, (des dizaines à des milliers par millimètre) est déposé. Un réseau à la propriété de diffracter la lumière dans une direction reliée à sa longueur d'onde figure (1.11). Un faisceau incident avec plusieurs longueurs d'onde est séparé angulairement dans différentes directions. Inversement, plusieurs longueurs d'onde $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ venant de différentes directions peuvent être combinées dans la même direction. L'angle de diffraction dépend de l'espacement de la fente et de l'angle d'incidence. [12]

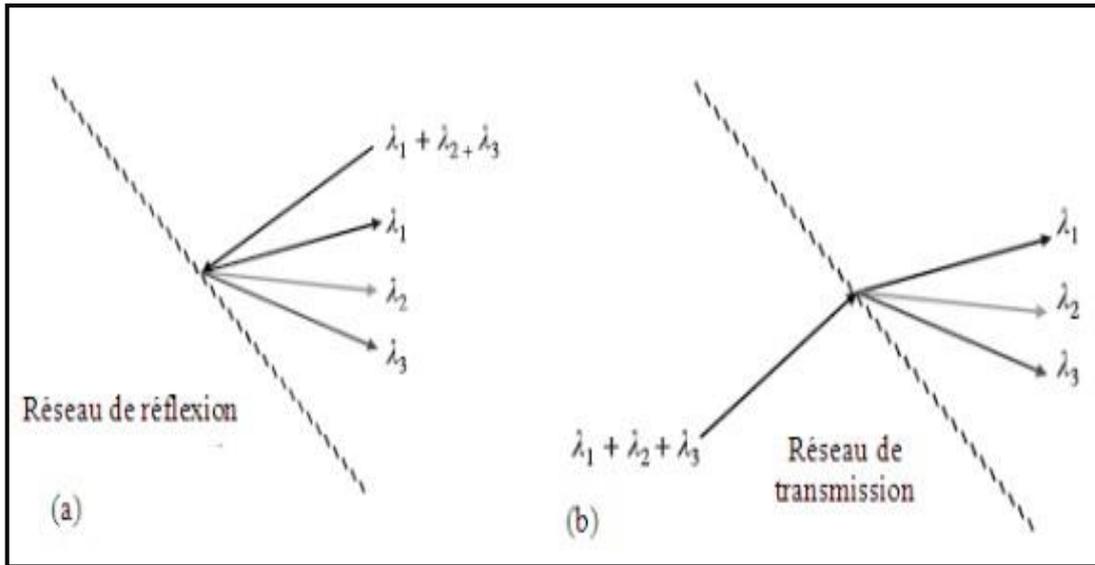


Figure I.11 : Principe d'un démultiplexage par diffraction dans un réseau optique : les longueurs d'onde λ_1 , λ_2 , λ_3 venants d'une fibre de transmission sont diffractées dans différentes directions. Le réseau travaille en (a) réflexion et en (b) transmission. [12]

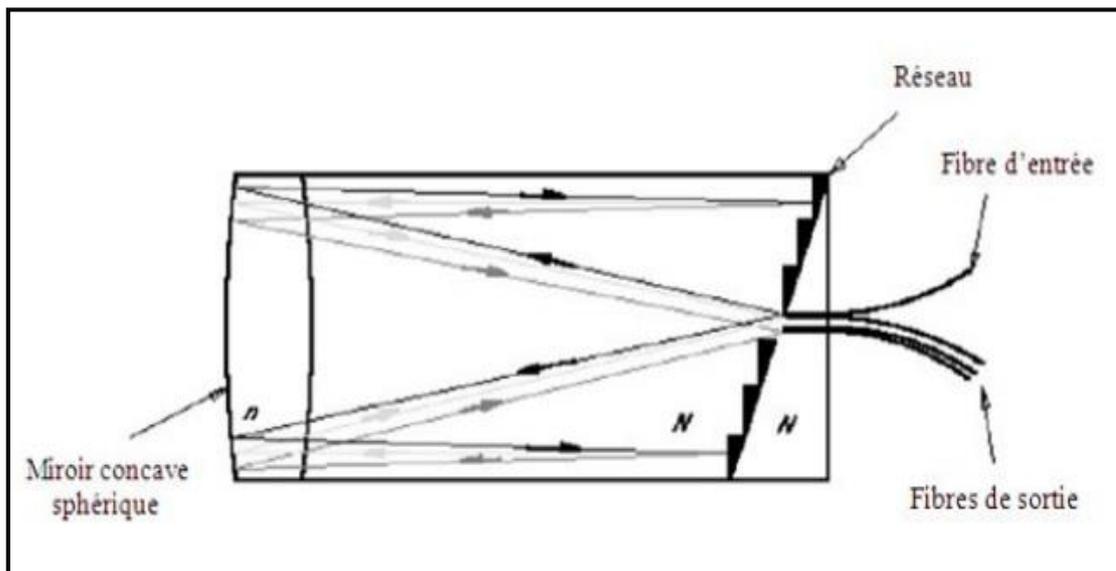


Figure I.12 : Configuration d'un démultiplexeur basé sur un réseau d'avec une combinaison de deux matériaux d'indices n et N présentant la même valeur de dispersion. [13]

Le Mux/Démux par diffraction est à faible perte $< 4\text{dB}$, mais son assemblage est délicat en connectique avec un encombrement important, il a de bonne séparation spectral (50GHz) et a forte capacité 16-32-64-128 canaux, il offre un Démultiplexage en parallèle.

I.4.5. Mux/Démux PHASAR (AWG)

Le mot PHASAR est un acronyme anglais pour PHASed-Array qui signifie réseau de phase, réseaux de guides d'ondes (AWG Arrayed Wave guide Grating) Ce sont des circuits optiques intégrés, plus compacts, ils sont réalisés à partir de guides d'ondes planaires, ce qui réduit le coût de production. Les entrées et sorties sont préparées pour assurer une connexion avec les fibres optiques.

I.5 Présentation de l'AWG

Un PHASAR est composé principalement de trois parties : un coupleur d'entrée (guide d'entrée et région de propagation libre d'entrée), un réseau de guide (AWG) et un coupleur de sortie (région de propagation libre de sortie et guides de sortie).

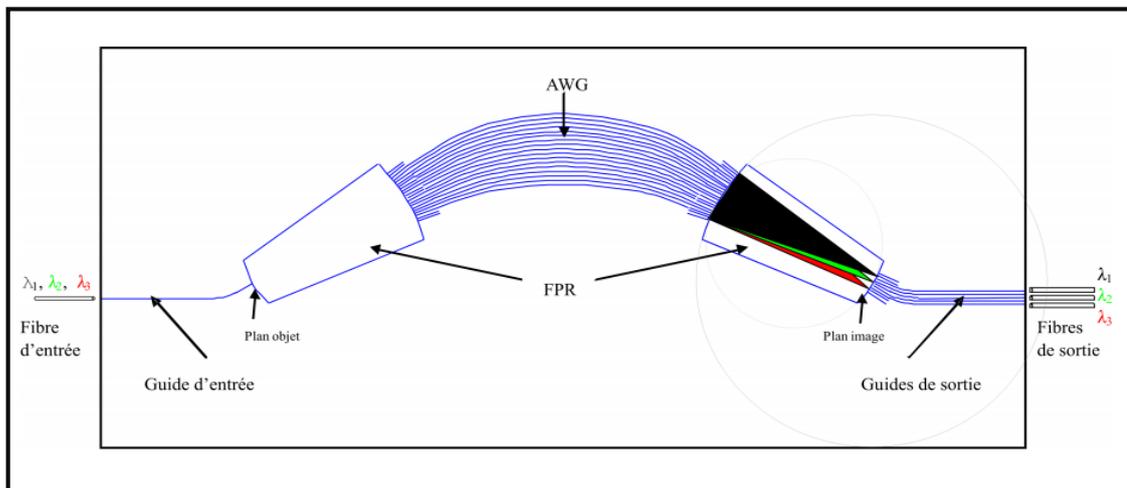


Figure 1.13 : Démultiplexeur optique d'un coupleur en étoile.

I.5.1. Principe général de fonctionnement d'un PHASAR

Le concept de base du fonctionnement de ce dispositif est le suivant. Tout d'abord, la source entrante se propage dans la région de propagation libre du guide d'ondes. Ensuite, le faisceau d'entrée se propage vers l'ouverture d'entrée des guides d'ondes en réseau, et est collecté par chaque bras du réseau en étoile, se propageant indépendamment dans chacun d'eux. Chaque guide d'onde du réseau étoile est choisi de manière à avoir une longueur de trajet supérieure à celle du guide d'onde adjacent. À la longueur d'onde centrale, l'onde dans chaque bras de l'ensemble arrivera avec la même phase relative, produisant une image miroir au deuxième coupleur en étoile du champ dans le premier coupleur. Ainsi, lorsqu'il se propage dans le deuxième guide d'ondes, il devient

convergent et sera focalisé au centre du côté de sortie du deuxième coupleur en étoile. Cependant, à d'autres longueurs d'onde, à mesure que le champ se propage le long des guides d'onde du réseau, les différences de longueur de trajet entraîneront une inclinaison du front de phase. Par conséquent, ces longueurs d'onde seront focalisées selon un angle par rapport au trajet de la longueur d'onde centrale. À la sortie de la deuxième région de propagation libre (FPR), des guides d'ondes récepteurs sont placés de manière à ce que ces champs focalisés puissent être correctement confinés et guidés vers l'extérieur.

I.5.2. Caractéristiques des PHASARS

Les principales caractéristiques d'un PHASAR sont :

- ❖ La longueur d'onde centrale, λ_0 .
- ❖ La séparation spectrale entre canaux, $\Delta\lambda_0$.
- ❖ L'intervalle spectral libre, ISL.
- ❖ Les pertes par insertion, L_0 .
- ❖ La diaphonie totale, D_j .

a. Pertes d'insertion :

La perte d'insertion est une mesure de la diminution de puissance d'un signal optique lorsqu'il traverse le dispositif. Elle est généralement exprimée en décibels (dB).

Voici quelques figures expliquant les étapes de transformation du faisceau dans le démultiplexeur.

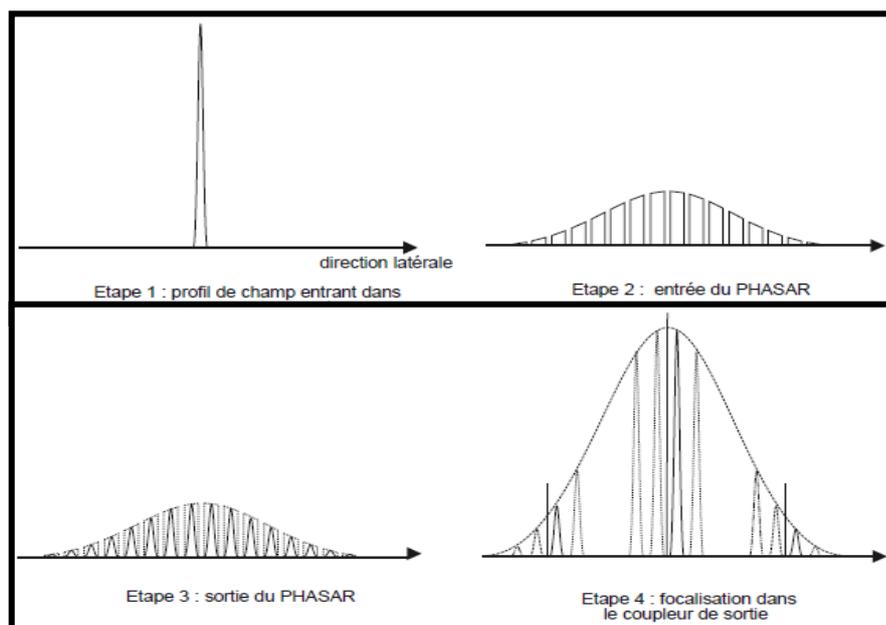


Figure I.14 : Étapes de transformation du faisceau dans le démultiplexeur.

b. Diaphonie (Crosstalk) :

La diaphonie, également appelée "crosstalk" en anglais, est un phénomène indésirable qui se produit dans un phasar elle se manifeste comme un chevauchement entre les canaux.

La diaphonie fait référence à l'interférence ou à l'interaction entre les différents canaux optiques adjacents, ce qui peut entraîner une dégradation des performances du système.

La diaphonie adjacente est définie comme la différence en dB entre le signal maximal du canal et le minimum de transmission du canal adjacent dans une bande spectrale donnée.

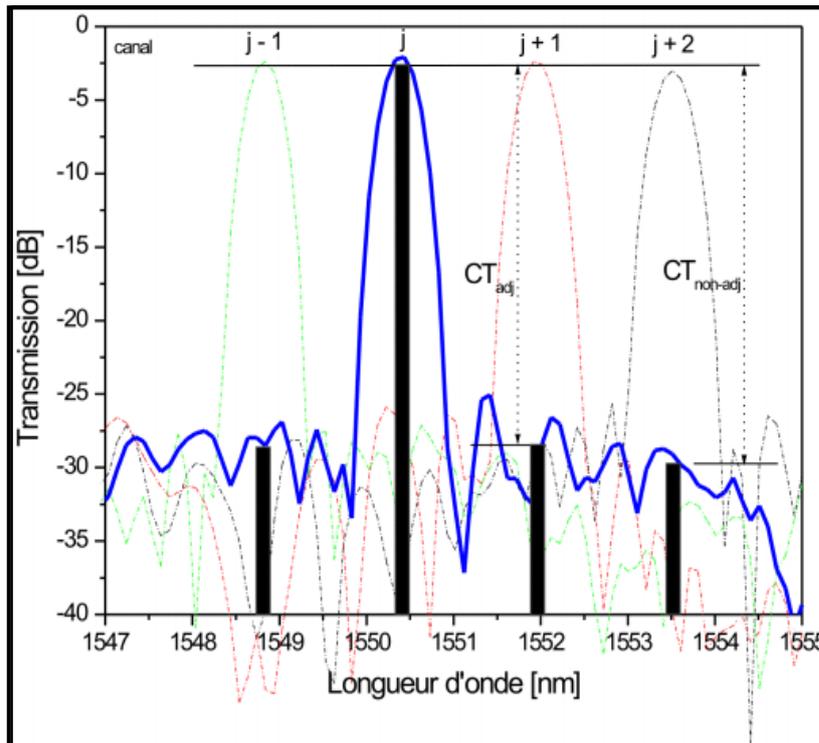


Figure I.15 : Définition de diaphonie.

c. Intervalle spectrale libre :

L'intervalle spectral libre (ISL) d'un phasar AWG (ArrayedWaveguideGrating) est défini comme la plage de fréquences dans laquelle chaque canal optique individuel peut être transmis sans interférence avec les autres canaux adjacents.

d. La longueur d'onde centrale :

C'est la longueur d'onde de fonctionnement du phasar, généralement c'est la même longueur d'onde de fonctionnement de la source laser.

e. La séparation spectrale entre canaux :

C'est l'espacement entre les longueurs d'ondes, c'est cette valeur qui détermine l'alternative pour le WDM

I.6. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons décrit le principe et les différentes techniques de multiplexage en longueur d'onde (WDM). Ainsi nous avons énumérer toutes les structures de multiplexeur-démultiplexeurs. Nous avons présenté le principe, ainsi que les caractéristiques d'un PHASAR.

Dans le chapitre suivant, nous aborderons plus en détail la conception d'un AWG (ArrayedWave Guide) via l'outil BeamPROP.

Chapitre 99 :
Optique 101 :

Design D'un AWG
DESIGN D'UN AWG

(Arrayed Waveguide
(ARRAYED WAVEGUIDE

Grating) sous BeamProp
GRATING) SOUS BEAMPROP

II.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons le modèle de l'AWG conçu via le simulateur BeamProb. Nous commençons d'abord par une brève description de l'outil de simulation utilisé, ainsi que la méthode et moyens de calcul qu'il dispose, puis nous passons à la présentation détaillée du modèle conçu et nous décrivons les étapes à suivre pour la simulation.

II.2. Présentation du simulateur ‘ BeamPROP’

BeamPROP est un programme de simulation intégré avec Rsoft Photonique CAD.

Le programme principal contient un Système complet de la disposition du Rsoft (CAD) pour concevoir, simuler et analyser les paramètres des différents composants optiques. Il est basé sur la méthode des différences finies et la méthode BPM.

Ce module intègre un utilitaire qui permet la simulation d'un phasas d'optique intégrée.

II.2.1. Description de la méthode utilisée pour la simulation

L'utilitaire AWG est divisée en deux parties : Utility Router WDM Layout et Router WDM simulation.

- **Utility Router WDM Layout** permet la conception du coupleur d'entrée et le coupleur de sortie pour la simulation.
- **Router WDM simulation** permet le lancement de simulation d'AWG y compris les deux coupleurs, et ceci en créant un scénario pour l'exécution d'une simulation.

En premier, le coupleur d'entrée est simulé par BPM (Beam Propagation Method). Ensuite, un programme appelé PHASECOR simule les différences de phase dans le réseau déphaseur. Finalement, le coupleur étoile de sortie est simulée par BPM avec les entrées de chaque réseaux. Un dossier de données et de graphes seront générés par Winplot, pour montrer la réponse en longueur d'onde de l'AWG.

Le BeamPROP est basé sur la méthode de propagation de faisceau(BPM). Au cœur du BeamPROP-3D il y a un programme de calcul extrêmement robuste capable de trouver les solutions rigoureuses des équations d'ondes de Maxwell, des solutions qui sont complètement vectorielles et entièrement bidirectionnelles, tenant compte de toutes les réflexions aux joints à l'interface des différents composants du dispositif, car l'algorithme bidirectionnel modélise toutes les réflexions internes.

Étant donné que les routeurs AWG ont tendance à être de grandes structures, le processus de simulation de ces dispositifs a été divisé en trois étapes. La première étape est une simulation BPM du coupleur en étoile d'entrée à la longueur d'onde centrale. La seconde est une simulation de l'effet du tableau WG via une routine de ligne de commande externe. La dernière étape est une simulation BPM de l'étoile de sortie.

II.3. Design d'un AWG sous BeamProp[14]

Comme on a vu au chapitre 1, le phasar est composé de trois principales parties : le coupleur d'entrée, le réseau de guide et le coupleur de sortie.

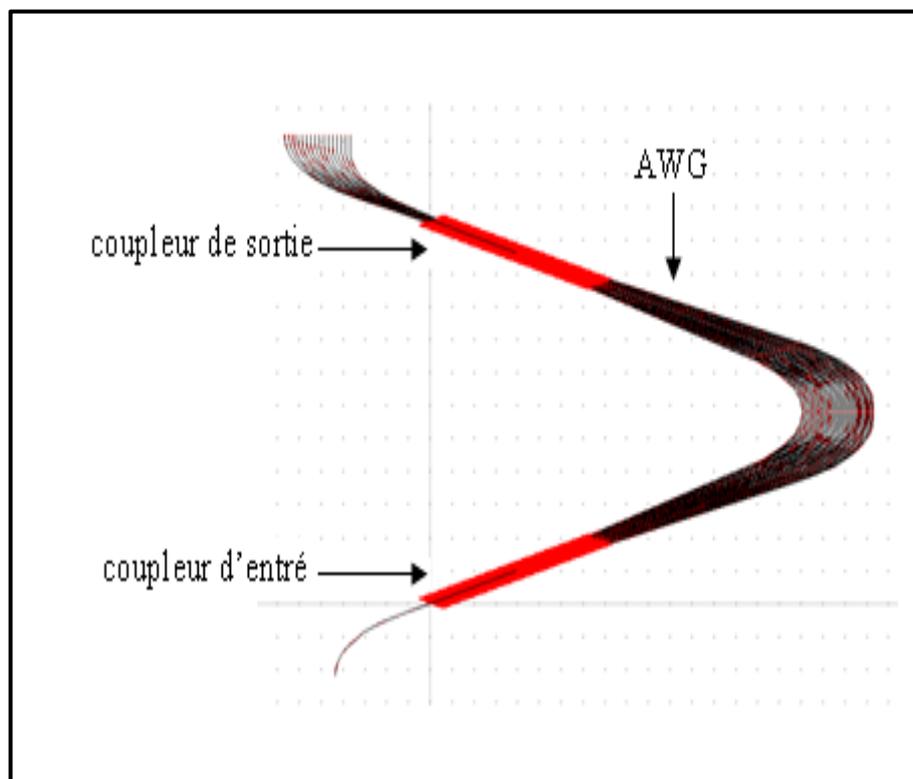


Figure II.1 : Structure typique d'un phasar

II.3.1. Le coupleur d'entrée

Le coupleur d'entrée est schématisé sur la figure (II.2), il est composé d'un guide d'onde d'entrée, une région de propagation libre et un réseau de phase.

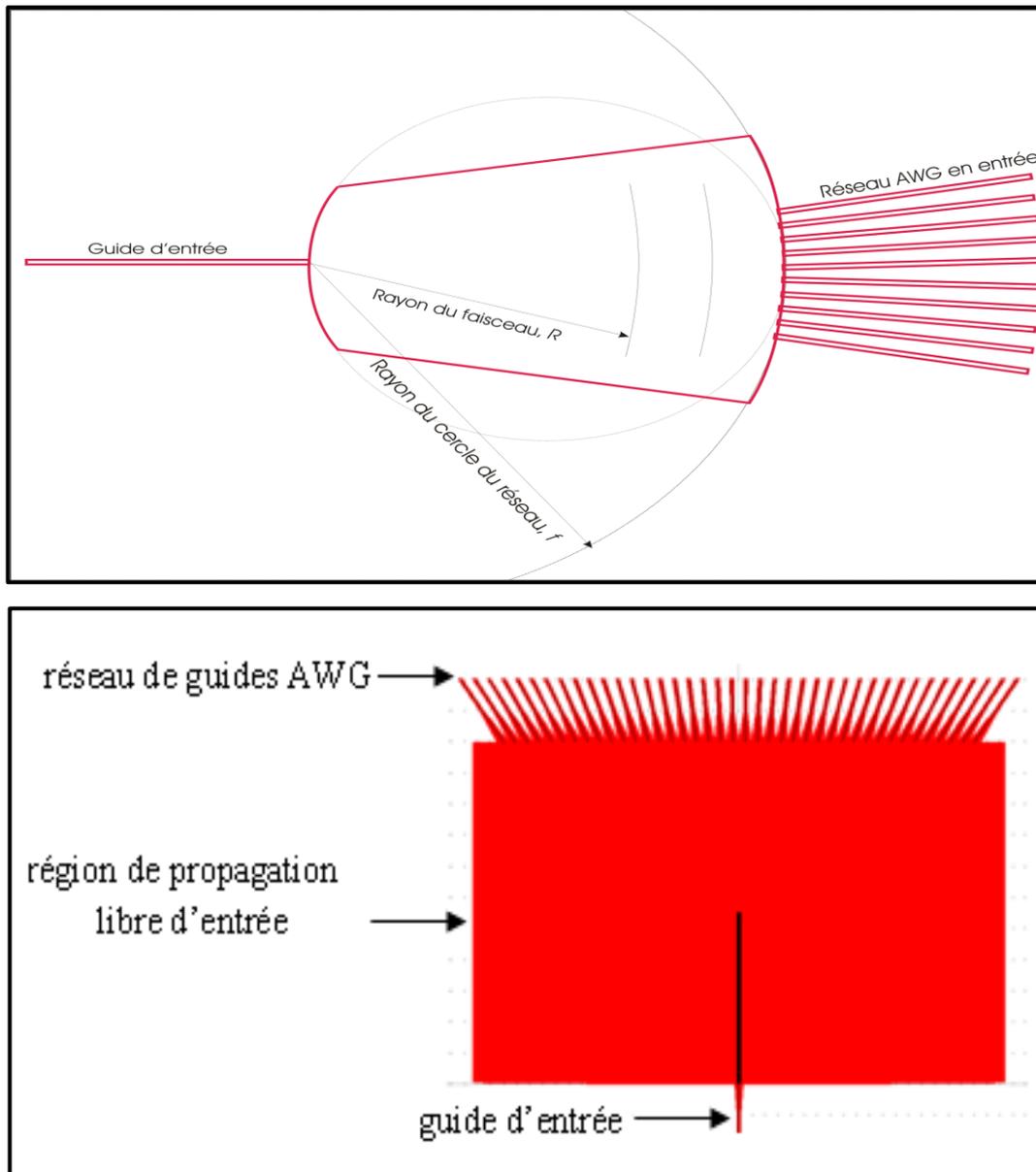


Figure II.2 : Structure du coupleur d'entrée

Les zones de propagation libre sont conçues dans le contexte des coupleurs en étoile. Les coupleurs en étoile dans l'AWG sont basés sur une géométrie de cercle de Rowland. La géométrie de ces coupleurs en étoile est illustrée dans la Figure (II.3) ci-dessous.

L_f : la distance focale du coupleur en étoile

Pour trouver la dispersion angulaire du système, nous différencions l'équation (II.3) par rapport à λ . Nous ne supposons que $\theta_i \approx \theta_o \approx 0$. De plus, nous supposons que θ_i est constant. Ainsi, nous obtenons :

$$m = n_s d \frac{\partial \theta_o}{\partial \lambda} + \frac{\partial n_a}{\partial \lambda} \Delta L \quad (\text{II.6})$$

Près de la fréquence centrale :

$$m = n_s d \frac{\partial \theta_o}{\partial \lambda} + \frac{\partial n_a}{\partial \lambda} \frac{m \lambda_0}{n_a} \quad (\text{II.7})$$

$$\frac{\partial \theta_o}{\partial \lambda} = \frac{m}{dn_s} \left(1 - \frac{\lambda_0}{n_a} \frac{\partial n_a}{\partial \lambda} \right) \quad (\text{II.8})$$

$$\frac{\partial \theta_o}{\partial \lambda} = \frac{mn_g}{dn_s n_a} \quad (\text{II.9})$$

Où :

$$n_g = n_a - \lambda_0 \frac{\partial n_a}{\partial \lambda} \quad (\text{II.10})$$

Et puisque :

$$\partial f = \frac{-c}{\lambda^2} \partial \lambda \quad (\text{II.11})$$

$$\frac{\partial \theta_o}{\partial f} = - \frac{m \lambda^2 n_g}{c dn_s n_a} \quad (\text{II.12})$$

Ainsi, les équations (II-9) et (II-12) nous donnent les relations de dispersion en fonction de la longueur d'onde et de la fréquence.

Ensuite, nous résolvons l'espacement des canaux en fonction de la longueur d'onde et de la fréquence.

$$\Delta \lambda = \frac{\Delta x}{L_f} \frac{\partial \lambda}{\partial \theta_0} = \frac{\Delta x dn_s n_a}{L_f mn_g} \Bigg|_{\lambda=\lambda_0} \quad (\text{II.13})$$

$$\Delta f = \frac{\Delta x}{L_f} \frac{\partial f}{\partial \theta_0} = \frac{\Delta x dc n_s n_a}{L_f mn_g \lambda^2} \Bigg|_{\lambda=\lambda_0} \quad (\text{II.14})$$

Nous calculons maintenant la plage spectrale libre (FSR free spectral region). La FSR est le facteur déterminant le nombre de canaux autorisés. La FSR peut être calculée en utilisant l'équation (II.3) pour le canal d'ordre $m+1$. Ainsi, pour :

$$FSR = N \Delta f \text{ [Hz]} \quad (\text{II.15})$$

Où : N = Nombre de canaux

On a :

$$(n_s + \Delta n_s)d \sin \theta_i + (n_c + \Delta n_c)\Delta L + (n_s + \Delta n_s)d \sin \theta_o = (m+1)\frac{c}{f + FSR} \quad (\text{II.16})$$

Ensuite, nous trouvons que :

$$\Delta n_c = \frac{\partial n_c}{\partial f} FSR = -\frac{c}{f^2} \frac{\partial n_c}{\partial \lambda} FSR \quad (\text{II.17a})$$

$$\Delta n_s = \frac{\partial n_s}{\partial f} FSR = -\frac{c}{f^2} \frac{\partial n_s}{\partial \lambda} FSR \quad (\text{II.17b})$$

Enfin, en résolvant l'équation (II-16) en utilisant les équations (II.17a), (II.17b), (II.3), en supposant que $f(f+FSR) = f^2$, et

$$n_g \approx n_s - \lambda \frac{\partial n_s}{\partial \lambda} \text{ pour } \Delta L \gg d(\sin \theta_i + \sin \theta_o) \quad (\text{II.18})$$

Nous obtenons la relation

$$FSR = \frac{c}{n_g (\Delta L + d \sin \theta_i + d \sin \theta_o)} \text{ [HZ]} \quad (\text{II.19})$$

Pour les ports diagonaux où $\theta_i + \theta_o = 0$

$$FSR = \frac{c}{n_g \Delta L} \text{ [HZ]} \quad (\text{II.20})$$

En utilisant l'équation (II.11) pour trouver la FSR en fonction de la longueur d'onde,

$$FSR = \frac{\lambda}{m} \frac{n_a}{n_g} \text{ [m]} \quad (\text{II.21})$$

II.3.2 . Conception du coupleur en étoile dans un AWG

La lentille qui constitue le corps du coupleur d'entrée est construite à partir de la géométrie montrée dans la Figure (II.4). La conception est essentiellement identique pour le coupleur de sortie, sauf que la lumière sera incidente sur l'arc balayé par \mathbf{R}_o plutôt que par \mathbf{R}_i^* .

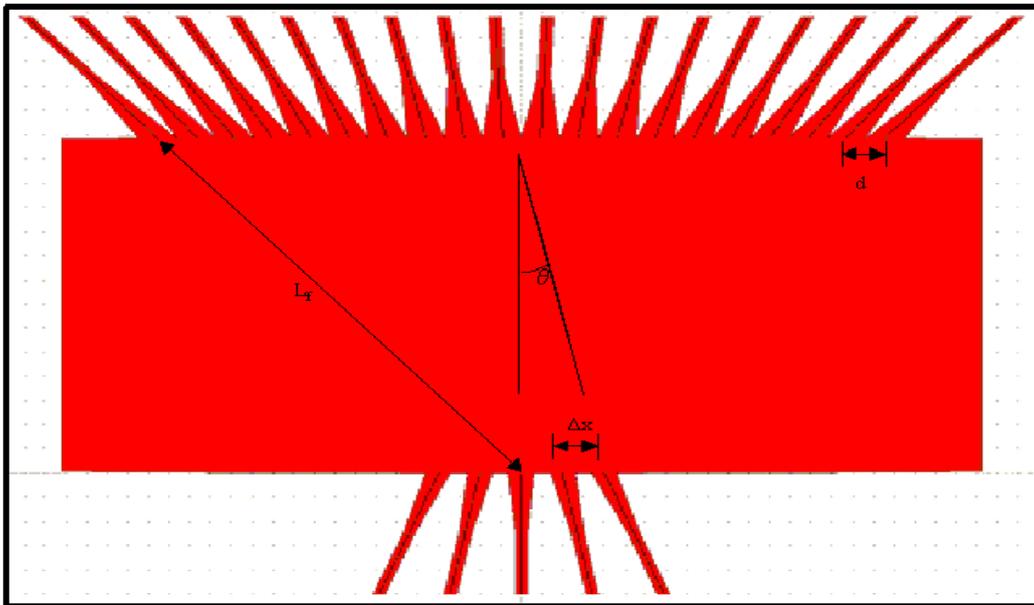


Figure II.4 : Conception basique du coupleur en étoile (FPR) [14].

II.3.3. Le réseau des guides d'onde dans un AWG

Le réseau AWG est formé de plusieurs guides d'onde de forme RIB et de longueur différente. La longueur de chaque guide diffère d'un nombre entier de longueurs d'onde.

La différence de phase introduite par la différence de longueur est $\beta\Delta L$ avec une constante de propagation du guide $\beta = 2\pi n_{\text{eff}} / \lambda$.

Chaque longueur d'onde sort du guide avec un angle différent [16].

L'AWG est la partie essentielle dans la conception du phasar. Dans ce réseau chaque guide d'ondes est sélectionné pour avoir une longueur de trajet supérieure à la longueur de trajet d'un guide d'ondes adjacent d'un multiple entier de la longueur d'onde de fonctionnement centrale du dispositif.

Ainsi, l'ensemble présente une différence de longueur de trajet entre chaque guide d'onde successif de :

$$\Delta L = \frac{m\lambda_0}{n_a} \quad (\text{II.21})$$

Ou : m : un nombre entier ou l'ordre du guide dans le réseau

λ_0 : Longueur d'onde centrale

n_a : L'indice effectif du guide d'ondes en réseau

L'utilitaire BeamPROP AWG génère la conception illustrée en (b), ainsi qu'une autre conception similaire à (b) sauf que l'arc est coupé au milieu et un segment droit est introduit.

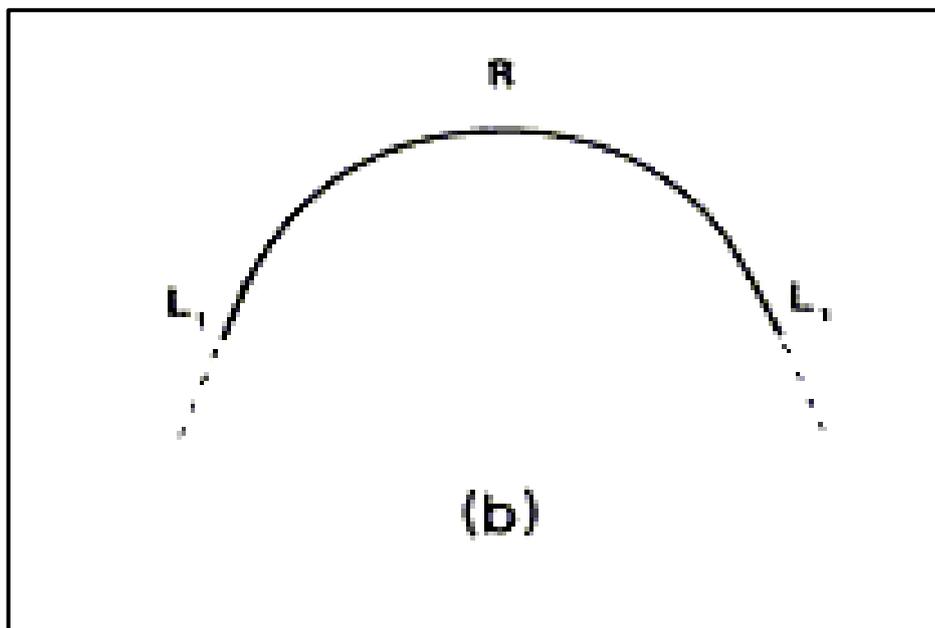


Figure II.5 : Forme du guide d'onde AWG sous BeamProp

II.3.4. Le coupleur de sortie

Le coupleur de sortie possède la structure illustrée sur la figure (II.6). Il est composé d'un réseau de guides, d'une région de propagation libre et de guides de sorties.

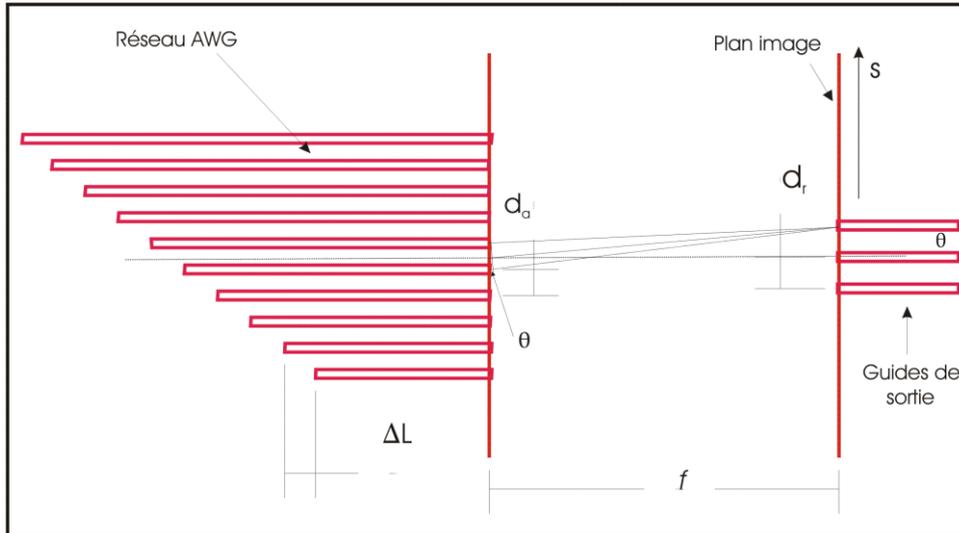


Figure II.6 : Exemples de méthodes de disposition pour les guides d'ondes en réseau.

[14]

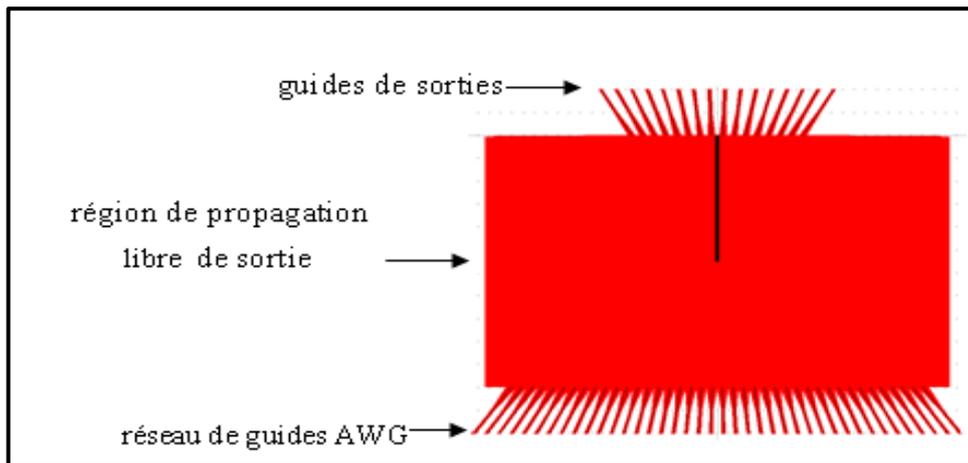


Figure II.7 : Structure du coupleur de sortie

Nous présentons les paramètres géométriques et optiques selon que Beamprob possède.

II.4 Paramètres du phasar AWG

Cette partie illustre l'approche que BeamPROP utilise pour concevoir la géométrie des coupleurs conventionnels.

Paramètres	Description
Di	séparation du guide d'onde à cercle de l'entrée
Do	séparation du guide d'onde à cercle de sortie

Wit	largeur du guide d'onde du cercle de l'entrée (a défini pour être $2 * width$)
Wot	largeur du guide d'onde du cercle de sortie (a défini pour êtreDo (Faites))
Lit	longueur detaper de l'entrée
Lot	longueur de taper de sortie
Li	longueur de guides d'ondes de l'entrée (a défini pour être $2 * Lit$)
Lo	longueur des guides d'onde de sortie (a défini pour être $2 * Lot$)
Dz	déplacement de centres de construction Rowland standard
Lambda0	la longueur d'onde de centre
Dlambda	l'espacement de canal
Nchan	le nombre de canaux de la longueur d'onde

Tableau II.1 : Paramètres spécifiques des coupleurs et ceux qui définissent les caractéristiques du AWG

II.5. Etapes à suivre lors de la conception du design

Afin de comprendre le fonctionnement théorique, nous allons procéder à la simulation d'un phasar et ceci à travers ces différents composants.

Dans le menu programme BeamPROP, en cliquant l'onglet Utility (Utilitaire) → WDM Router Layout (Disposition du routeur WDM) comme indiquer sur la Figure (II.8).

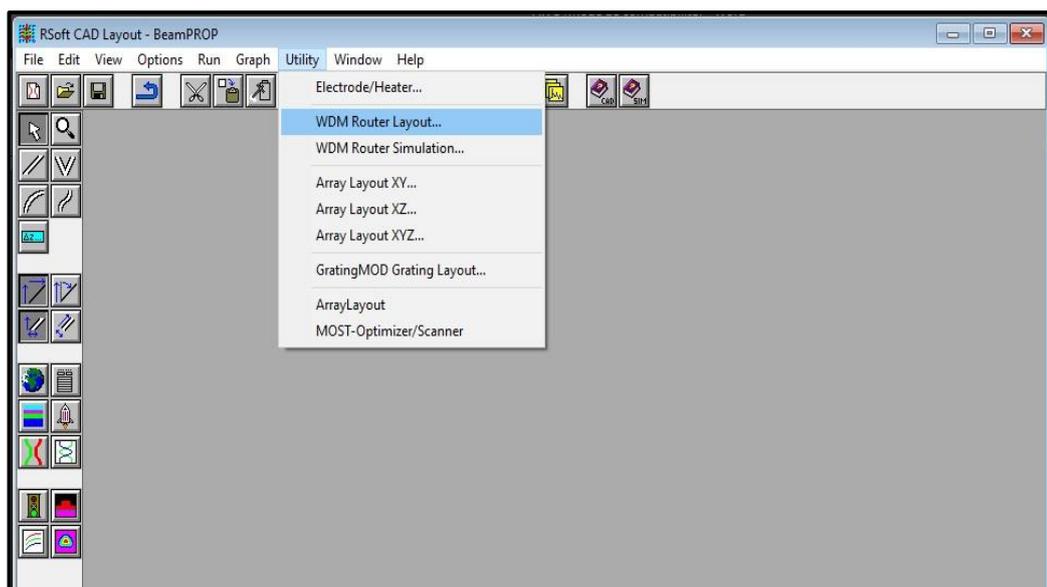


Figure II.8 : Ouverture du menu WDM Router Layout sur BeamPROP.

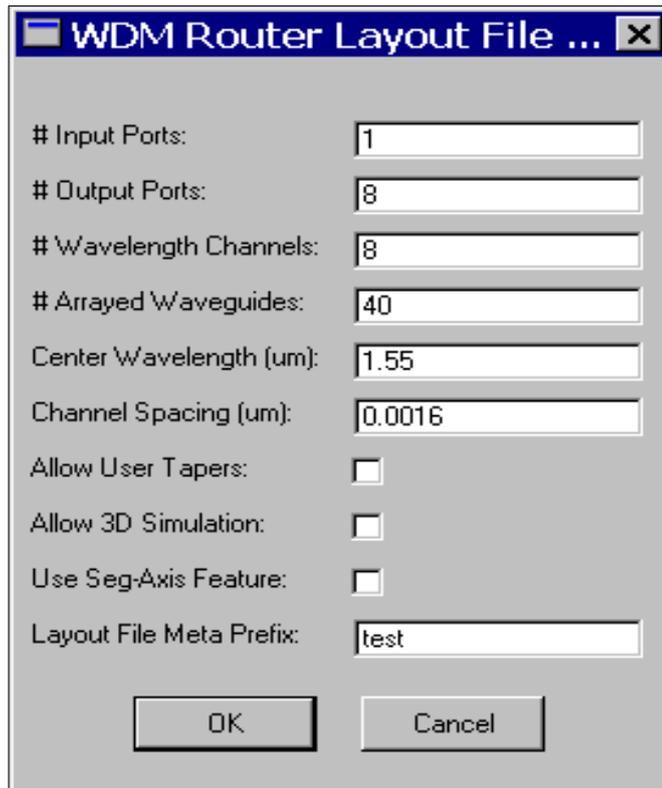


Figure II.9 : Boite de dialogue WDM Router Layout.

La boîte de dialogue suivante apparaîtra :

Où

- # Input Ports : nombre de ports à l'entrée du coupleur en étoile.
- # Output Ports : nombre de ports à la sortie du coupleur en étoile.
- #WavelengthChannels : longueurs d'onde des canaux.
- #ArrayedWaveguides : nombre de guides d'onde du réseau.
- Center Wavelength : longueur d'onde centrale en (um) micromètre.
- Channel Spacing : espacement des canaux.
- Allow User Tapers : pour modifier les paramètres des Tapers.
- Use Seg-Axis Feature : pour utiliser les données des axes.
- Layout File Meta Prefix : pour donner un nom de fichier.

Dans la boîte de dialogue WDM Router Layout on entre les paramètres qui détermineront la topologie du dispositif. Le nombre de canaux de longueur d'onde **#WavelengthChannels**, peut différer du nombre de ports de sortie **#Output Ports**. Il est courant de spécifier un nombre de guides d'ondes supérieur au nombre de ports de sortie,

puis d'utiliser uniquement les canaux plus centralement situés sur ces ports de sortie. Cela permet d'obtenir une réponse spectrale plus uniforme. On entre un préfixe (Layout File Meta Prefix) qui sera utilisé pour identifier les fichiers BeamPROP résultants, puis on clique sur OK. Les fichiers suivants seront générés :

- <meta-prefix>in.ind Entrée du coupleur en étoile
- <meta-prefix>out.ind Sortie du coupleur en étoile
- <meta-prefix>full.ind Mise en page complète en forme de "cercle" du réseau
- <meta-prefix>flat.ind Mise en page complète en forme "plat" du réseau

Pour cet exemple, les coupleurs en étoile d'entrée et de sortie sont présentés ci-dessous.

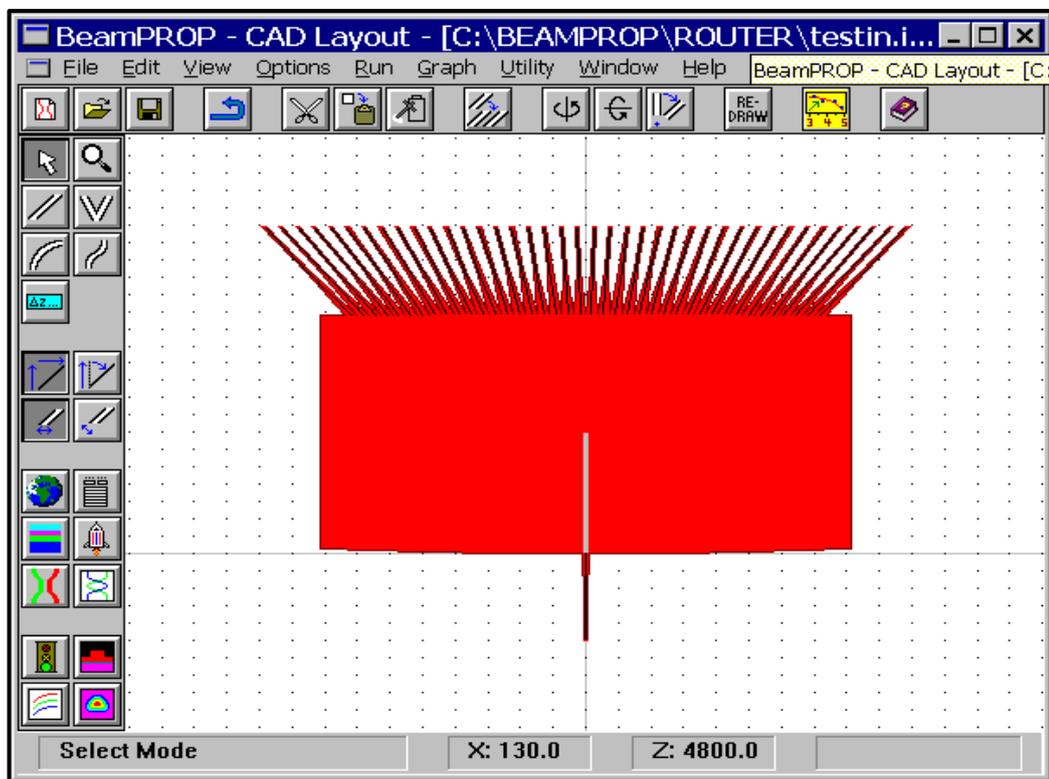


Figure II.10 : Coupleur en étoile Entrée.

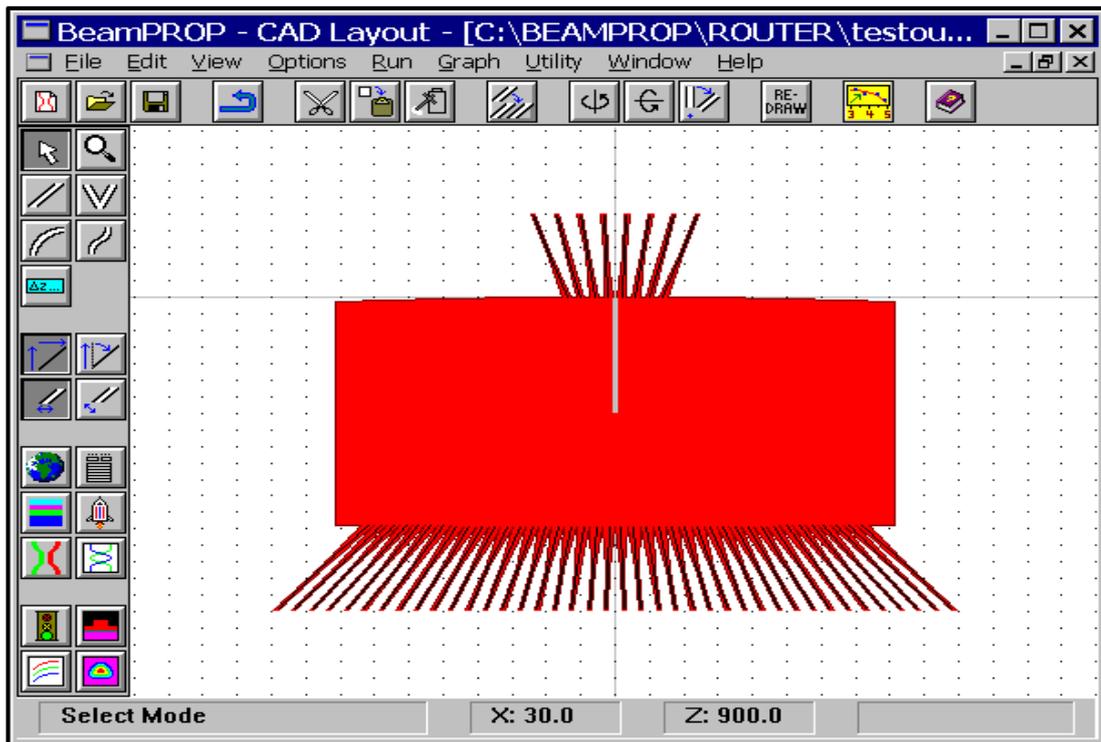


Figure II.11: Coupleur en étoile Sortie.

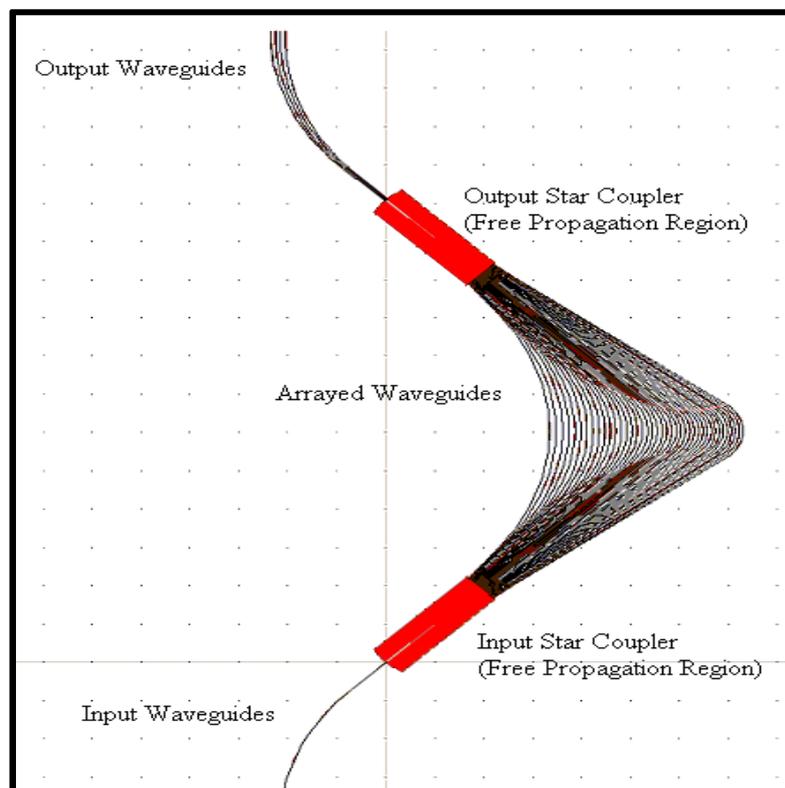


Figure II.12 : Structure typique d'un multiplexeur AWG sur BeamProp.

Pour ouvrir ces dossiers Figure (II.10/11/12), en cliquant sur : File/Open Circuit  .

II.5.1. L'utilitaire de simulation du routeur WDM (WDM Router Simulation Utility)

L'étape suivante consiste à générer les scripts de simulation pour la conception.

Utility → WDM Router Simulation (Figure II.13).

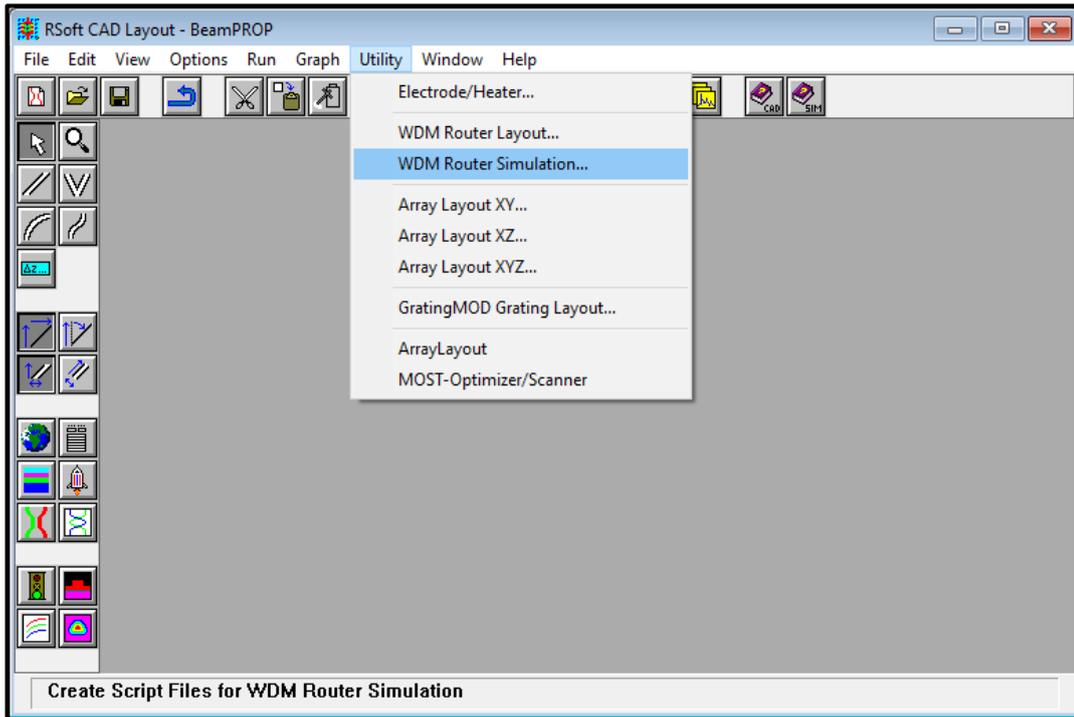


Figure II.13 : Ouverture du menu WDM Router Simulation sur BeamPROP.

La boîte de dialogue suivante apparaîtra :

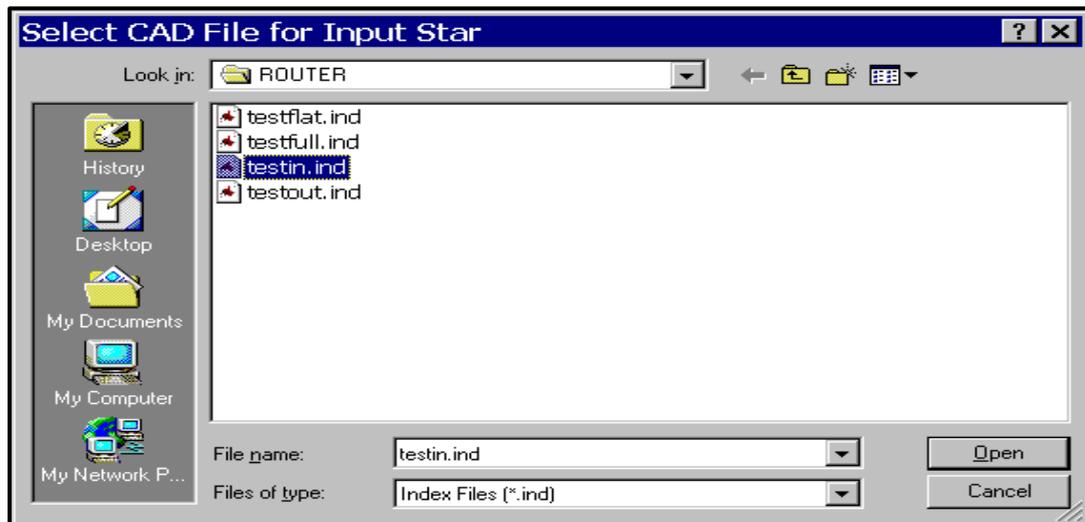


Figure II.14 : Boîte de dialogue pour choisir l'entrée du coupleur en étoile à simuler.

On sélectionne notre fichier.ind pour le coupleur en étoile d'entrée (différents fichiers peuvent exister pour différents designs ; dans notre cas, nous avons utilisé le préfixe "test" comme indiqué ci-dessus Figure (II-15). On clique sur Ouvrir, et la boîte de dialogue suivante apparaîtra.

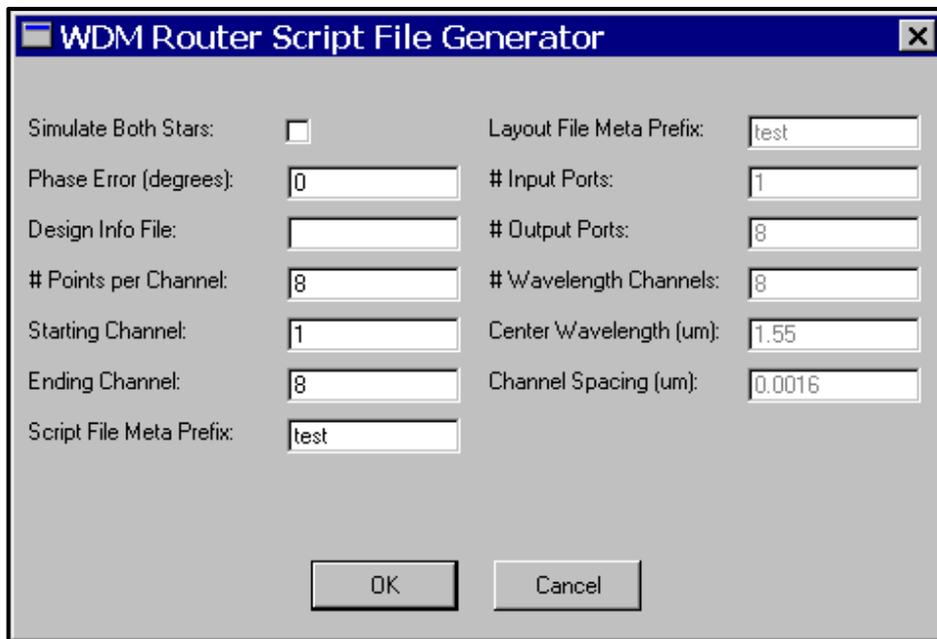


Figure III.15 : Boite de dialogue WDM Router générateur de fichiers de script.

Cette fenêtre rassemble les informations qui sont utilisées pour générer les scripts de simulation nécessaires pour exécuter les simulations du fichier de conception aux paramètres définis. Les paramètres de disposition précédemment choisis seront visibles, mais en grisés ; ils sont fournis ici uniquement à titre de référence.

- **SimulateBoth Stars** : En pratique, la propagation à travers les coupleurs en étoile peut être assez peu sensible à la longueur d'onde dans la plage de fonctionnement. En laissant cette option décochée, l'utilitaire ne simule que le coupleur en étoile d'entrée à la longueur d'onde centrale. Si cette case est cochée, les deux coupleurs en étoile sont ré-simulés à chaque longueur d'onde de balayage. Dans notre cas on laisse la case SimulateBoth Stars décochée.
- **Phase Error** : Ce champ permet d'inclure l'effet des erreurs de phase aléatoires générées par les imperfections du processus de fabrication. La phase de chaque guide d'onde est modifiée par un nombre aléatoire uniformément réparti entre 0 et l'erreur de phase saisie dans ce champ (degré). On le laisse vide.

- **Design Info File** : La possibilité de spécifier des informations de conception supplémentaires dans les simulations du routeur WDM. Dans notre cas on laisse ce champ vide.

II.5.2 Exécution de la simulation

Pour lancer l'exécution de la simulation, à partir des options de menu les scripts de simulation qui ont été créés précédemment, on doit sélectionner Run/Run Script... dans les options de menu de BeamPROP. La fenêtre suivante devrait apparaître.

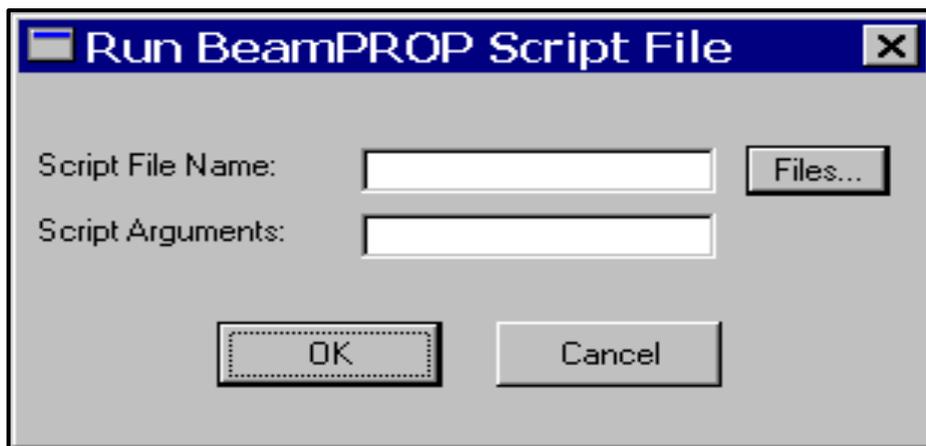


Figure II.16 : Boite de dialogue Script File dans le menu BeamPROP.

Ensuite, on devrait soit entré le nom du fichier dans notre cas testscan1.scr et appuyer sur OK, soit appuyer sur le bouton "Fichiers...". Dans les deux cas, on devrait sélectionner le fichier de script de balayage pour le port d'entrée souhaité.

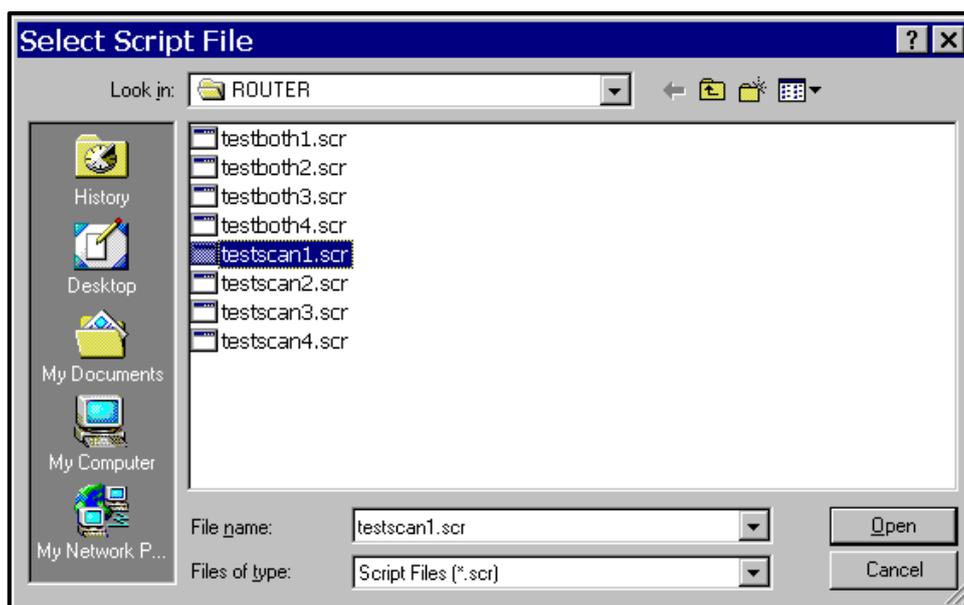


Figure II.17 : Sélection du fichier de script à exécuter depuis BeamPROP.

Après avoir cliqué sur OK dans la boîte de dialogue Figure (II.17), la série de simulation set on aura le résultat.

II.6. Conclusion

Dans ce chapitre on a décrit la procédure utilisée par l'utilitaire AWG Router du logiciel BeamProb puis nous avons détaillé les différentes étapes de simulation.

Dans le chapitre suivant nous allons présenter les résultats de simulations obtenues d'un phasar 16 canaux et 32 canaux.

Chapitre 999 :
Chapitre 999 :

Résultats de simulation et
RÉSULTATS DE SIMULATION ET
interprétations
INTERPRÉTATIONS

III.1. Introduction

L'objectif de ce chapitre est la présentation et l'analyse des résultats de simulation obtenus pour le dispositif AWG conçu.

Nous avons procédé à la simulation d'un Phasar 16 et 32 canaux, et ceci on étudie l'influence du nombre de réseau de guide sur les caractéristiques du Phasar.

III.2. Présentation des résultats de simulation

Le but de la simulation est l'analyse des performances de l'AWG en termes de perte d'insertion, de sélectivité spectrale, de réponse en fréquence et de diaphonie (crosstalk) entre les canaux adjacents.

Des simulations numériques ont été réalisées à l'aide du logiciel de modélisation optique WDM router, prenant en compte des phénomènes de propagation, des pertes par réflexion et de diffraction, afin d'évaluer les performances et les critères recherchés d'un phasar.

III.2.1. Simulation d'un Phasar 16 canaux.

Le premier résultat présenté dans ce chapitre est issu des simulations numériques effectuées sur un modèle d'AWG à 16 canaux.

Les paramètres nécessaires pour la conception du Phasar 16 canaux sont :

- ❖ La longueur d'onde centrale est **1.55 μm** ,
- ❖ Fréquence centrale de **193.5THz**,
- ❖ Espacement fréquentielle de **100GHz**
- ❖ L'espacement entre les canaux de **0.008 μm** ,
- ❖ Une seule entrée et **16** longueurs d'ondes de sortie,
- ❖ Indice de réfraction des guides d'ondes est **1.45666**.

On étudie l'influence du nombre de guide sur les pertes d'insertion dans la structure de l'AWG conçu, dans le but de trouver la valeur du nombre optimale qui permet la propagation sans dégradation de la puissance optique.

Nous reportons sur les figures ci-dessous le spectre de sortie obtenu, ainsi que la répartition de ces longueurs d'ondes au niveau du coupleur d'entrée pour plusieurs valeurs du nombre de guide noté : M (M = 40 ; 80 et 100).

La figure (III.1.a) montre le spectre de sortie obtenu, et la figure (III.1.b) montre la répartition des longueurs d'ondes au niveau du coupleur d'entrée.

➤ Pour $M = 40$

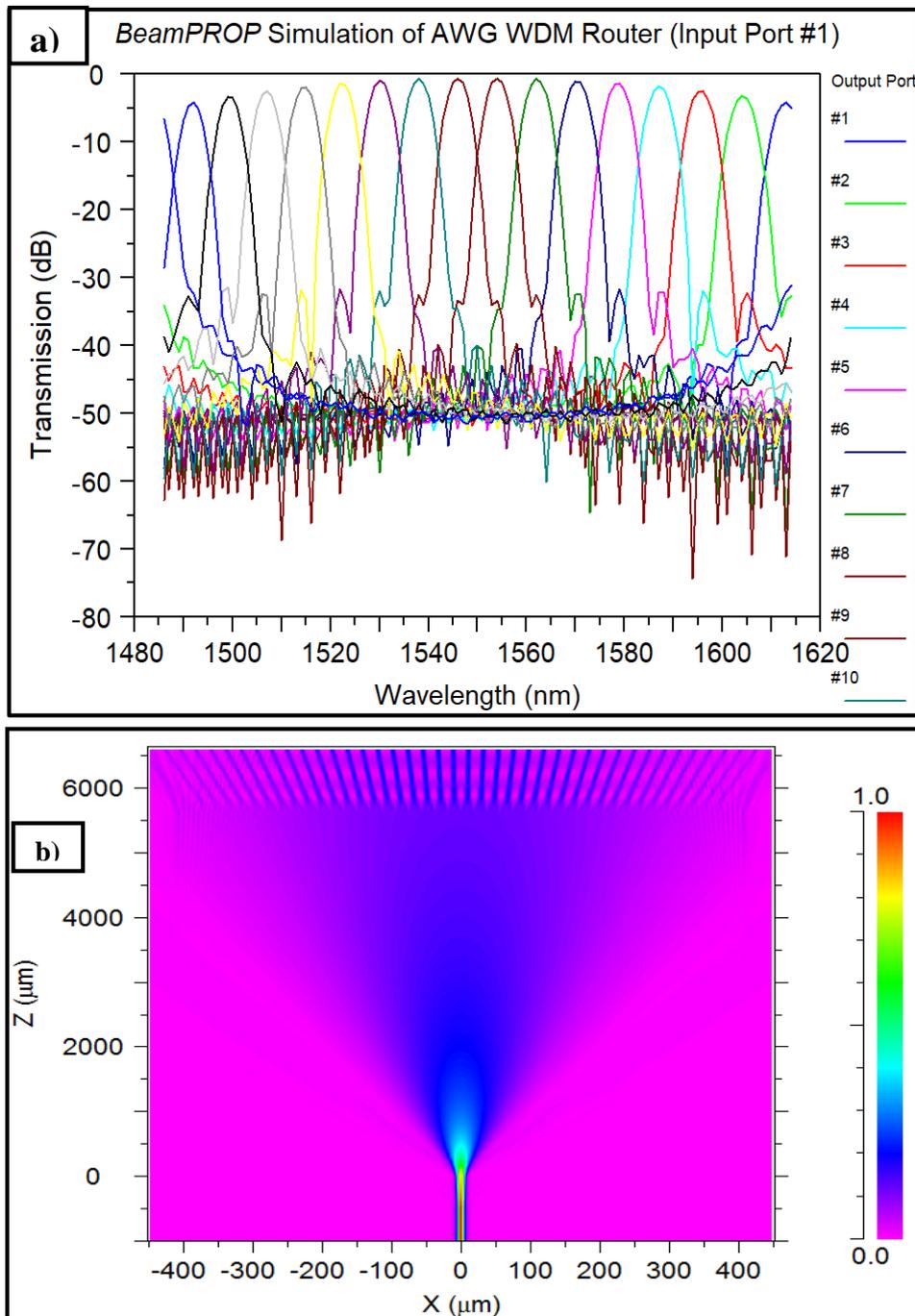


Figure III.1 : Résultats de simulation obtenue pour un nombre de guide de 40

a) Spectre de sortie

b) Répartition du champ

➤ Pour $M=80$

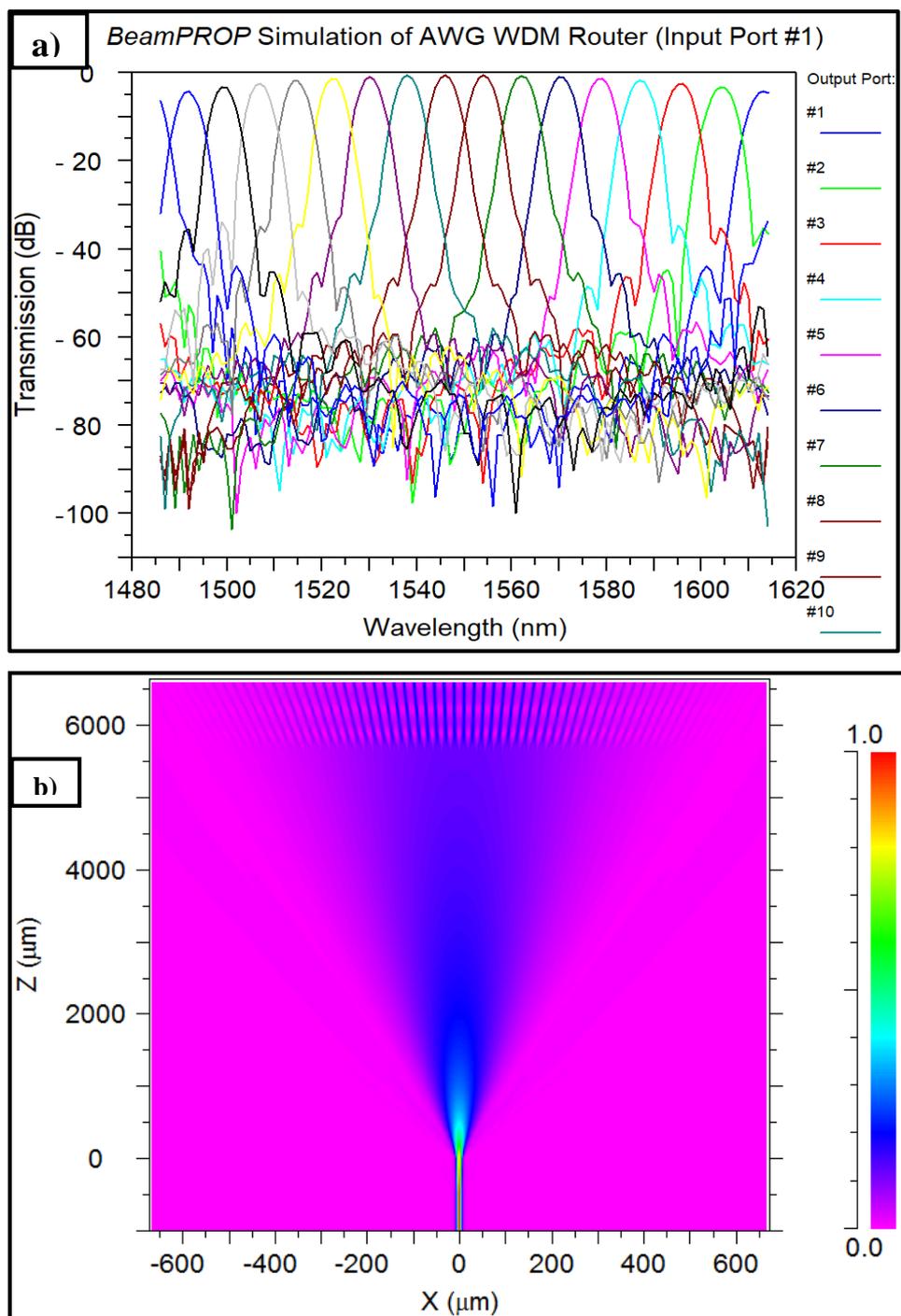


Figure III.2 : Résultats de simulation obtenue pour un nombre de guide de 80

a) Spectre de sortie

b) Répartition du champ

➤ Pour M=100

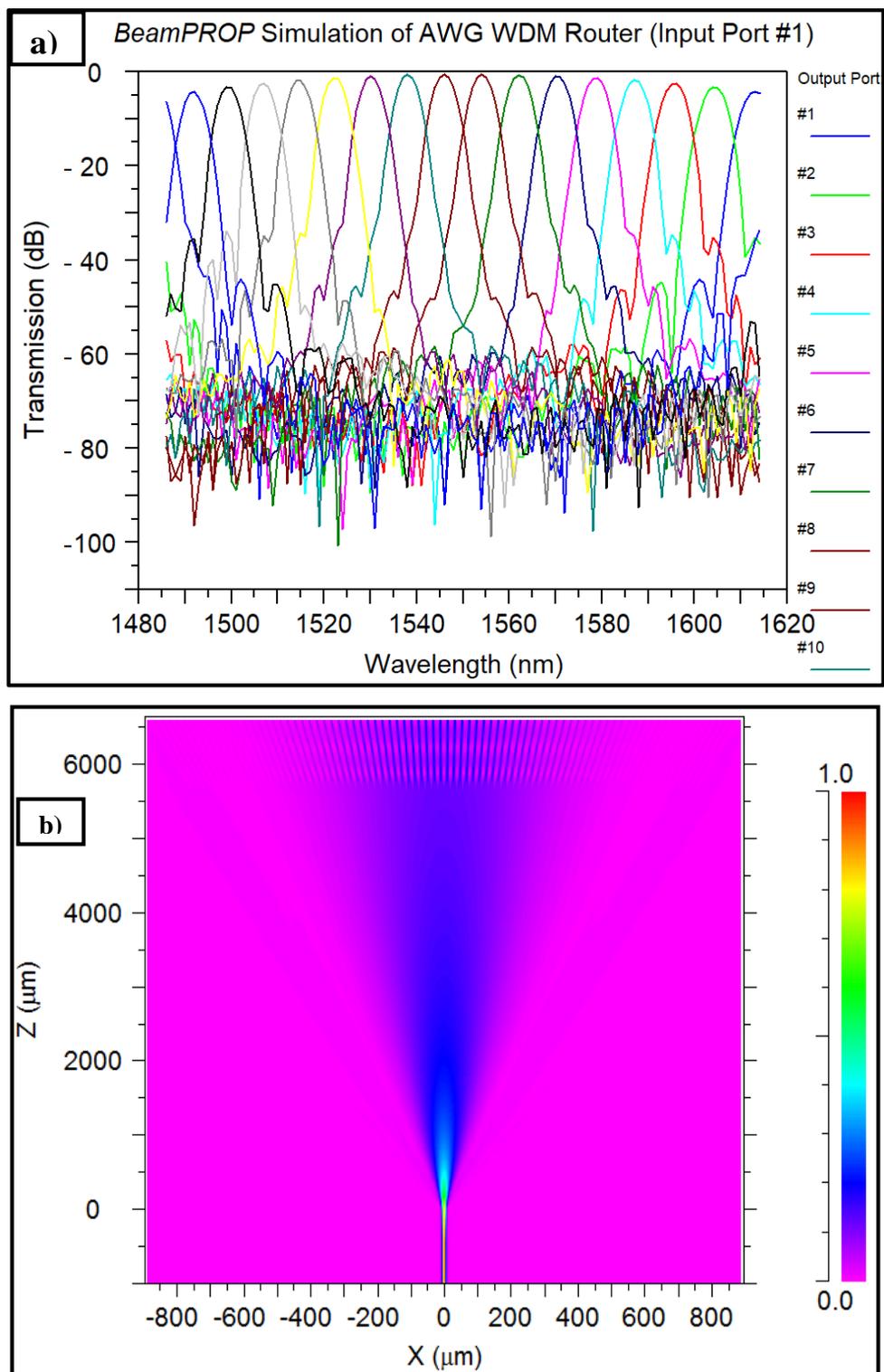


Figure III.3 : Résultats de simulation obtenue pour un nombre de guide de 100

a) Spectre de sortie

b) Répartition du champ

- On constate que les spectres obtenus ont presque la même allure, cependant il existe des différences, en ce qui concerne la perte d'insertion, la perte de propagation et la diaphonie.

Les canaux de sortie sont à des longueurs d'onde de 1613 nm (λ_1), 1604 nm (λ_2), 1596 nm (λ_3) et 1587 nm (λ_4) 1579 nm et 1579 nm (λ_5) et 1570 nm (λ_6) et 1562 nm (λ_7), ainsi 1554 nm (λ_8), 1546 nm (λ_9), 1538 nm (λ_{10}), 1530 nm (λ_{11}), 1522 nm (λ_{12}), 1515nm (λ_{13}), 1507nm (λ_{14}), 1499 nm (λ_{15}), 1492 nm (λ_{16}) et respectivement, ce qui indique un espacement simulé moyen entre canaux de 8 nm.

Le tableau (III.1) résume les valeurs de simulation trouvées, ainsi que la perte d'insertion pour chaque canal de sortie.

Canal	LONGUEUR D'ONDE (nm)	Espacement entre canaux (nm)	PERTES (dB) dans chaque canal (M=40)	PERTES (dB) dans chaque canal (M=80)	PERTES (dB) dans chaque canal (M=100)
1	1613	9	-4.3452	-4.3461	-4.3448
2	1604	9	-3.3981	-3.3919	-3.3957
3	1596	8	-2.517	-2.5172	-2.5167
4	1587	9	-1.8211	-1.8241	-1.8209
5	1579	8	-1.2972	-1.2957	-1.2983
6	1570	9	-0.91743	-0.92063	-0.91511
7	1562	8	-0.6702	-0.66927	-0.66941
8	1554	8	-0.54633	-0.54688	-0.54656
9	1546	8	-0.54644	-0.54704	-0.54513
10	1538	8	-0.6684	-0.66884	-0.67037
11	1530	8	-0.91567	-0.91346	-0.91239
12	1522	8	-1.2892	-1.2893	-1.2905
13	1515	7	-1.8053	-1.8057	-1.8028
14	1507	8	-2.5334	-2.5297	-2.5295
15	1499	8	-3.3461	-3.3471	-3.3439
16	1492	7	-4.412	-4.41	-4.3997

Tableau III.1 : Résultats de simulation calculés d'un AWG à 16 canaux pour plusieurs valeurs du nombre de guides dans le réseau de phase

L'analyse des résultats de simulation permet de constater que :

- Pour l'AWG avec 40 guides d'onde :

Les pertes pour chaque ordre de longueur d'onde varient entre -4.3452 dB et -0.54633 dB.

- Pour l'AWG avec 80 guides d'onde :

Les pertes pour chaque ordre de longueur d'onde varient entre -4.3461 dB et -0.54688 dB.

- Pour l'AWG avec 100 guides d'onde :

Les pertes pour chaque ordre de longueur d'onde varient entre -4.3448 dB et -0.54656 dB.

Afin d'avoir l'influence du nombre de guides sur les caractéristiques du Phasar, nous avons calculé les principaux paramètres caractéristiques comme : les pertes d'insertion, la diaphonie et l'intervalle spectrale libre.

Le tableau (III.2) résume les valeurs calculées.

Nombre de guides dans l'AWG	Paramètre et valeur			
	FSR Intervalle Spectrale libre (nm)	FRP la résolution spectrale (nm)	Perte d'insertion (dB)	Diaphonie (dB)
40	12 .80	7507.81	-4.412	-42
80	12.80	3753.9	-4.41	-60
100	12.80	3003.125	-4.3997	-61

Tableau III.2: Paramètres caractéristiques d'un AWG à 16 canaux pour plusieurs valeurs du nombre de guides dans le réseau de phase.

On remarque que la perte d'insertion diminue quand le nombre de guide augmente, cependant la diaphonie augmente !

La résolution spectrale FRP (**Free Spectral Range**), qui dépend du nombres de guide choisi selon la formule : $FRP = \lambda^2 / (M * \Delta\lambda)$. On constate que ça valeur diminue avec l'augmentation du nombre de guide.

Quant à l'intervalle spectrale libre, il est insensible au nombre du guide dans le réseau.

- L'impact du nombre de guide influe sur les paramètres caractéristiques du phasar AWG.
- Pour obtenir les performances souhaitées en termes de résolution spectrale, de largeur de bande, de pertes d'insertion et de diaphonie, un compromis doit être

imposé. Par exemple, si une résolution spectrale plus fine est nécessaire, la configuration avec 100 guides pourrait être préférable. Si une plus faible perte d'insertion est critique, la configuration avec 80 guides pourrait être plus adaptée.

Ce qui demande alors d'évaluer les performances en fonction des exigences spécifiques de l'application.

➤ Variation des pertes en fonction du nombre de guide

On reporte sur la courbe (III.4), la variation des pertes en fonction du nombre de guide dans le réseau AWG.

On constate une dégradation exponentielle des pertes suivant le nombre du guide.

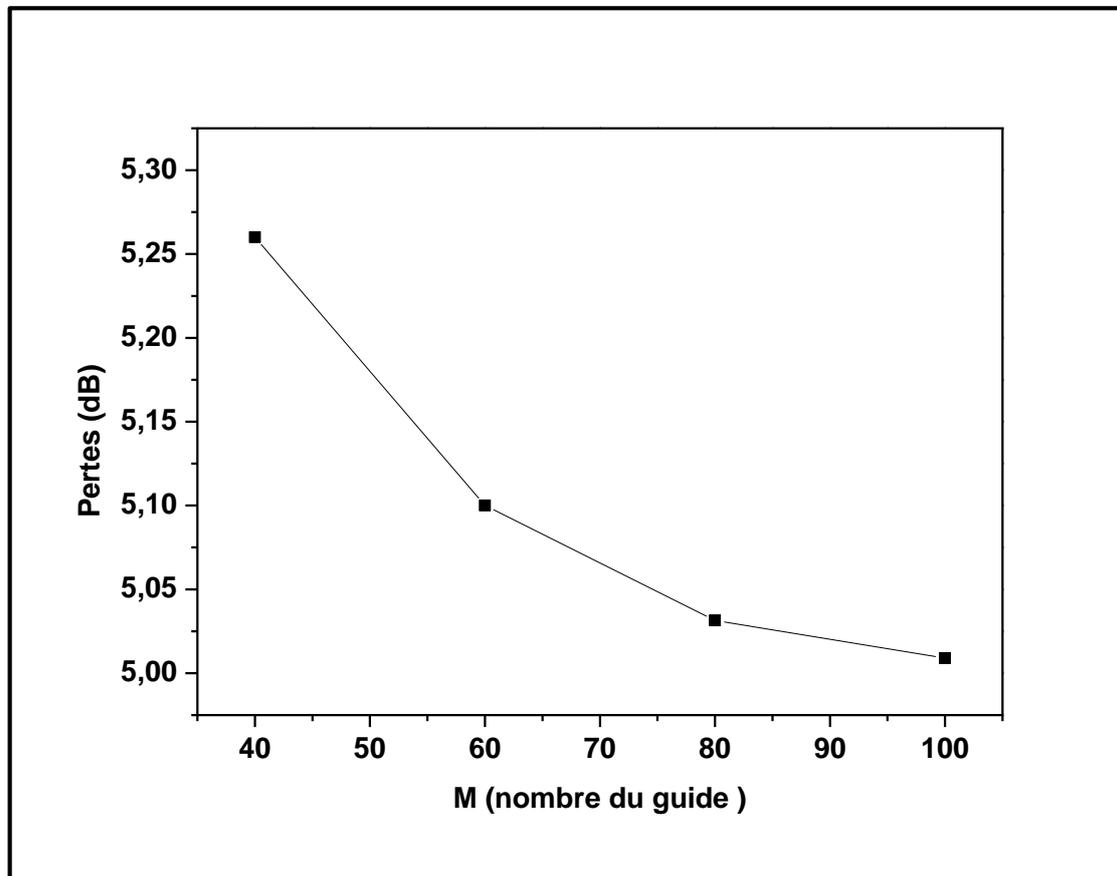
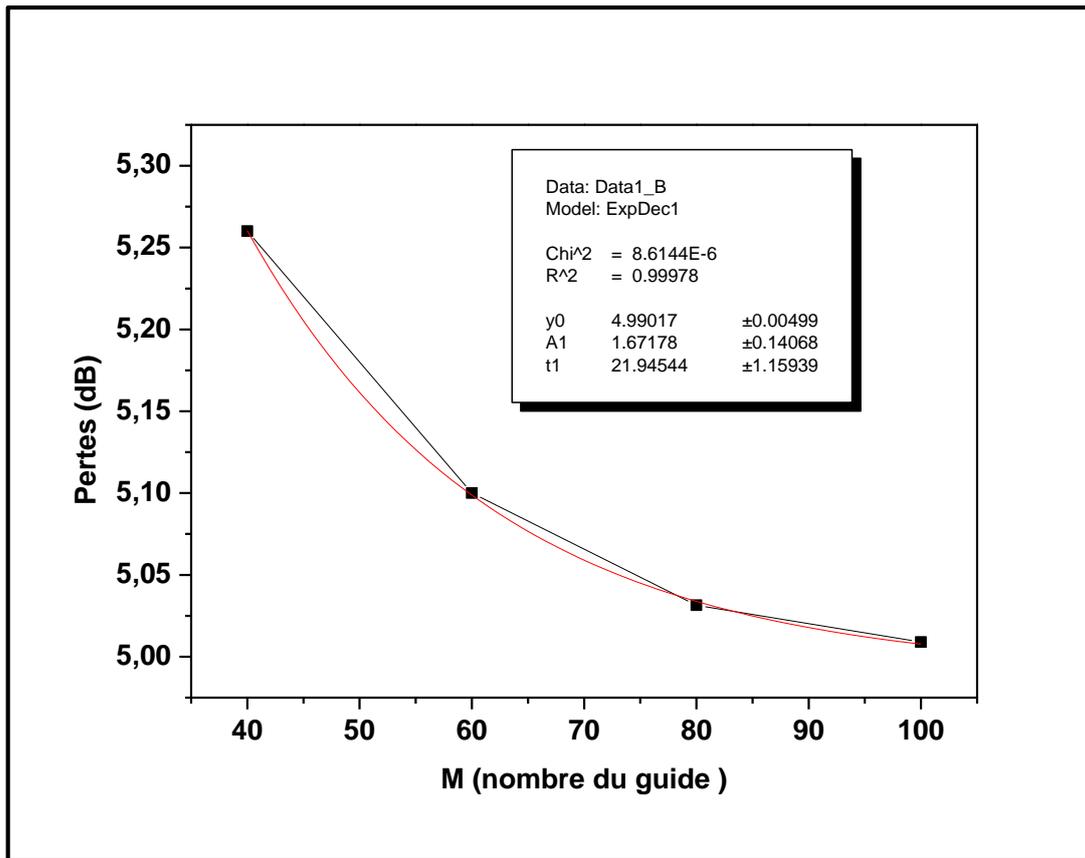


Figure III.4 : Variation des pertes d'insertion en fonction du nombre de guide d'ondes.

Le fit de cette variation est illustré dans la figure ci-dessous, il correspond à un fit exponentiel du premier ordre.

En effet, ce fit permet une modélisation mathématique pour ajuster le nombre de guide.



Cette expression mathématique résultante du fit, permet l'optimisation du nombre de guide.

III.2.2. Simulation d'un phasar 32 canaux

Les paramètres de cette simulation sont : La longueur d'onde centrale $1.550 \mu\text{m}$, l'espacement entre les canaux est de $0.004 \mu\text{m}$, avec une seule longueur d'onde en entrée et 32 canal de sortie (1x32).

Pour l'espacement entre canaux, on a pris les normes prises par l'UIT (Union Internationale des Communication)

Afin de déterminer l'impact du nombre de guides sur les caractéristiques de l'AWG, nous avons varié ce paramètre entre (60, 100 et 120) guides.

Nous présenterons ci-dessous les différentes courbes obtenues, en ce qui concerne le spectre de sortie et la répartition des différentes longueurs d'ondes.

➤ Pour $M = 60$

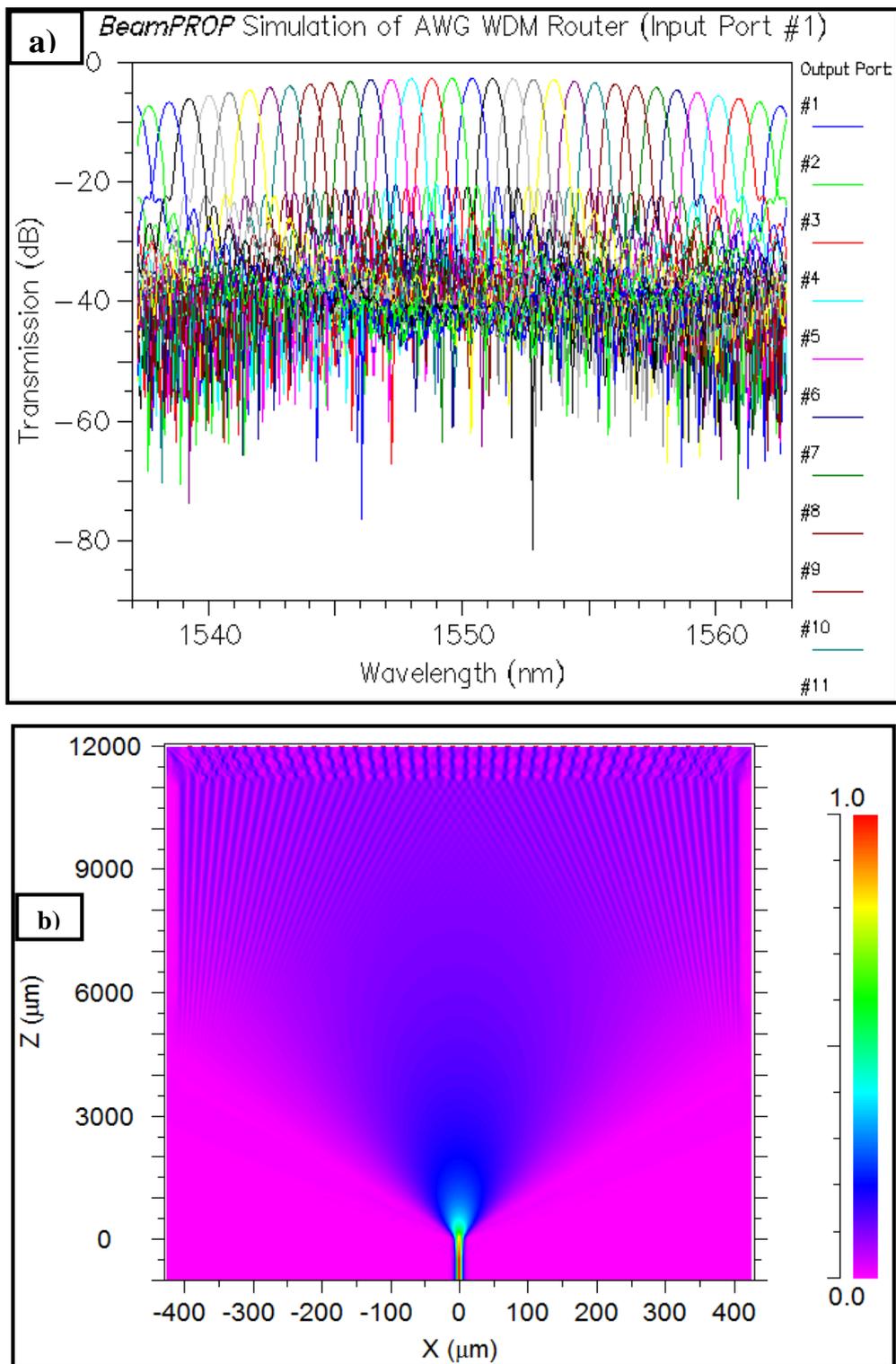


Figure III.5 : Résultats de simulation obtenue pour un nombre de guide de 60

a) Spectre de sortie

b) Répartition du champ

➤ Pour $M=100$

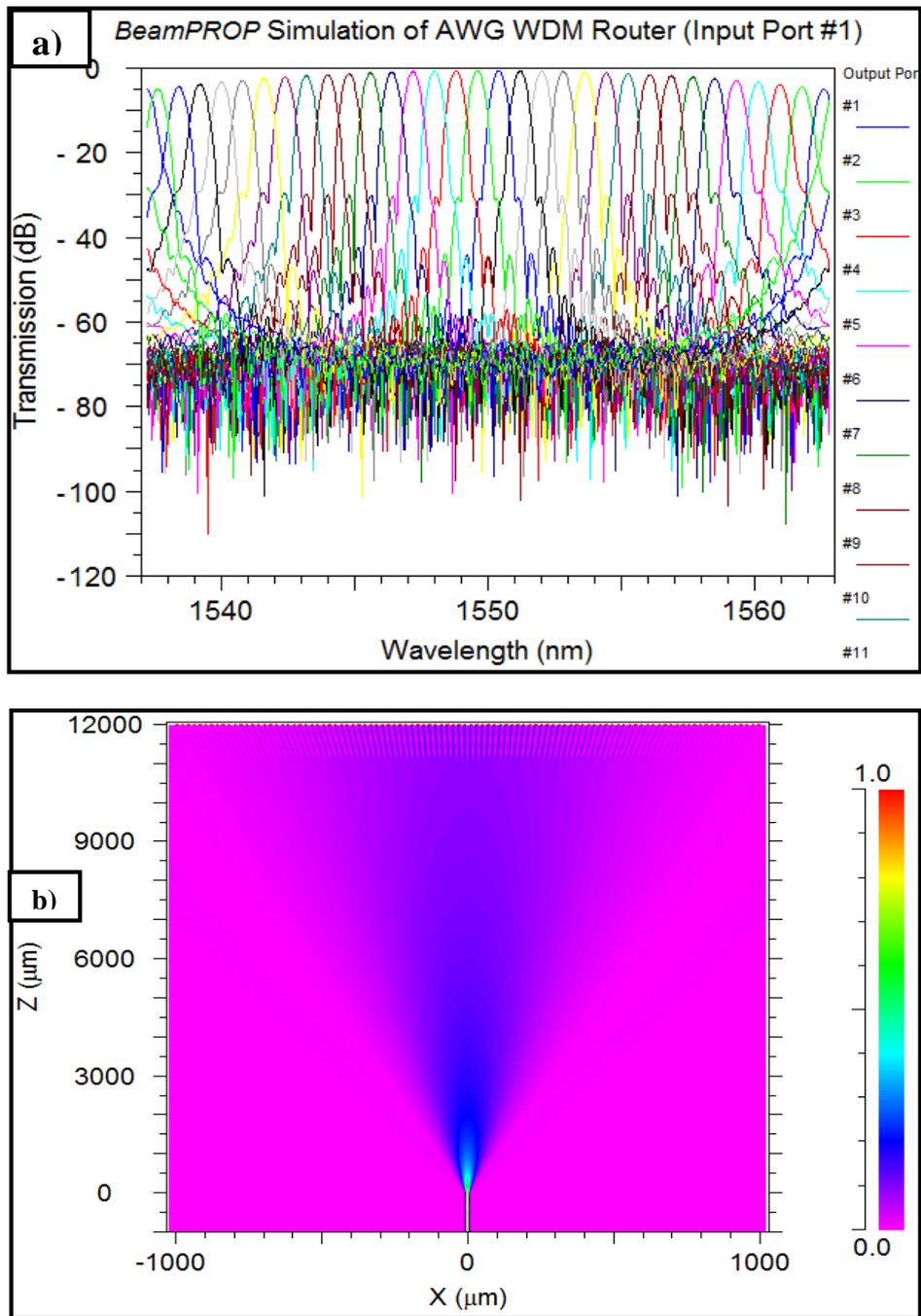


Figure III.6 : Résultats de simulation obtenue pour un nombre de guide de 100

a) Spectre de sortie

b) Répartition du champ

➤ Pour $M=120$

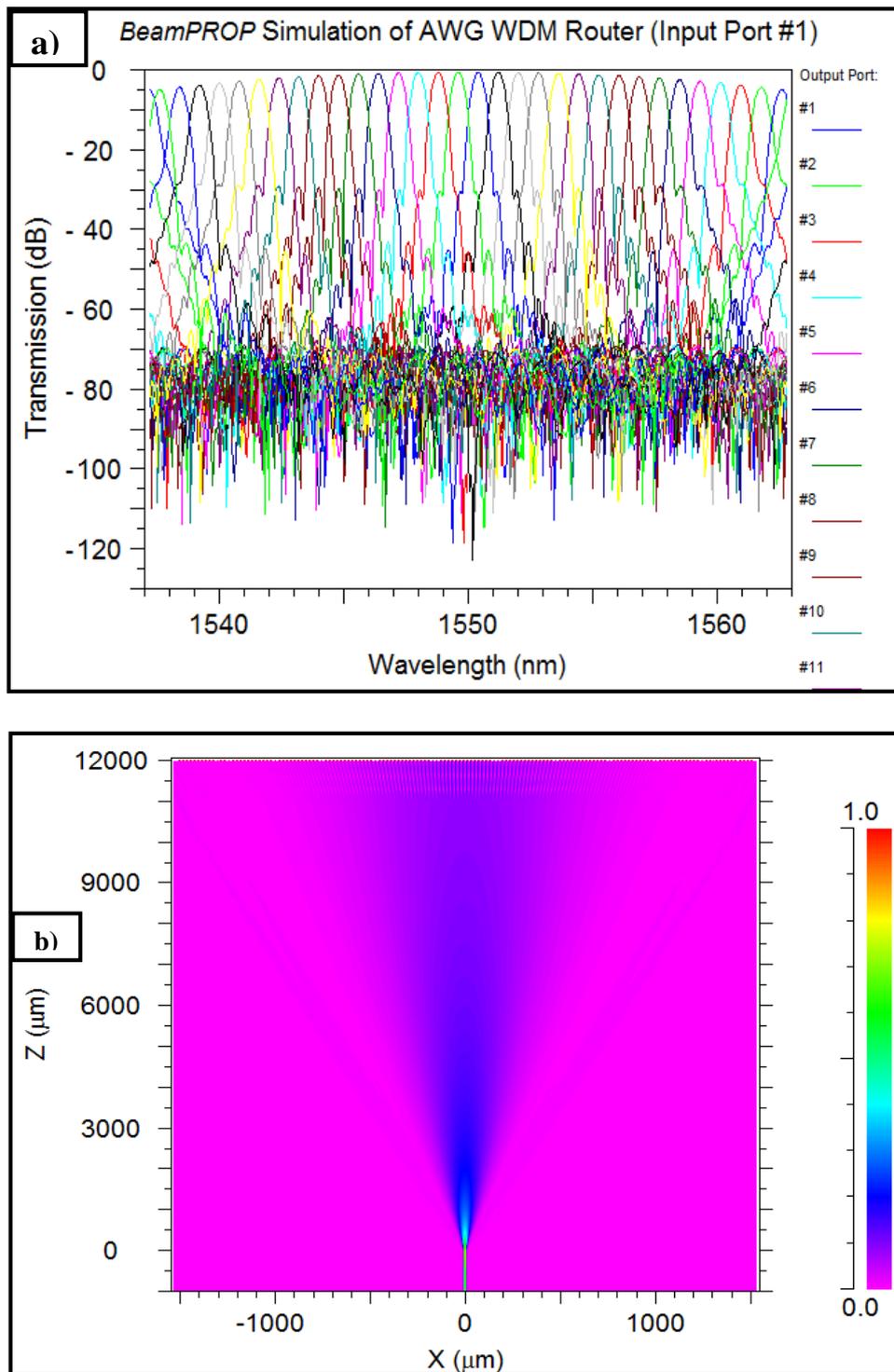


Figure III.7 : Résultats de simulation obtenue pour un nombre de guide de 120

a) Spectre de sortie

b) Répartition du champ

Les canaux de sortie sont répartis sur différentes longueurs d'onde allant de λ_1 (1556.2 nm) à λ_{32} (1543.8nm). Ces longueurs d'onde sont espacées de manière équidistante de 4 nm, ce qui correspond à une bande de fréquence de 50GHz.

Dans le tableau (III.3), nous reportons les valeurs de simulation calculées pour chaque canal de sortie avec la perte d'insertion associée.

CANAL	Longueur D'onde (nm)	AWG 60	AWG 100	AWG120
		PERTES (dB)	PERTES (dB)	PERTES (dB)
1	1556.2	-5.2566	-5.0242	-5.007
2	1555.8	-4.697	-4.3874	-4.3775
3	1555.4	-4.138	-3.7686	-3.7574
4	1555	-3.673	-3.267	-3.2577
5	1554.6	-3.2764	-2.8272	-2.82
6	1554.2	-2.934	-2.459	-2.4682
7	1553.8	-2.5812	-2.1552	-2.1637
8	1553.4	-2.2855	-1.8974	-1.9111
9	1553	-1.9809	-1.6304	-1.6284
10	1552.6	-1.7416	-1.3553	-1.3607
11	1552.2	-1.5407	-1.1337	-1.141
12	1551.8	-1.3817	-0.9461	-0.96
13	1551.4	-1.2592	-0.8097	-0.82
14	1551	-1.1613	-0.6989	-0.7141
15	1550.6	-1.096	-0.6365	-0.647
16	1550.2	-1.0525	-0.6007	-0.6131
17	1549.8	-1.0525	-0.5936	-0.6086
18	1549.4	-1.107	-0.6365	-0.6454
19	1549	-1.1577	-0.701	-0.7109
20	1548.6	-1.2484	-0.8012	-0.8077
21	1548.2	-1.3739	-0.9291	-0.94
22	1547.8	-1.5343	-1.0911	-1.094
23	1547.4	-1.7086	-1.2956	-1.3
24	1547	-1.9318	-1.5258	-1.531
25	1546.6	-2.2161	-1.8241	-1.825
26	1546.2	-2.4884	-2.1224	-2.127
27	1545.8	-2.8499	-2.4624	-2.476
28	1545.4	-3.2114	-2.8749	-2.8753
29	1545	-3.6533	-3.3437	-3.324
30	1544.6	-4.1354	-3.8313	-3.8215
31	1544.2	-4.7178	-4.4314	-4.4213
32	1543.8	-5.2601	-5.0315	-5.009

Tableau III.3 : Résultats de simulation calculés d'un AWG à 32 canaux de sortie avec 4nm d'espacement pour 80-100 et 120 nombre de guides dans le réseau de phase .

Le tableau (III.4) donne les valeurs des caractéristiques du Phasar calculées à partir des résultats de simulation trouvés.

Nombre de guides dans l'AWG	Paramètres et valeurs			
	Intervalle spectrale libre (nm)	FRP la résolution spectrale (um)	Pertes d'insertion (dB)	Diaphonie (dB)
60	12.10	10.01	-5.2601	-30
100	12.10	6.06	-5.0315	-43
120	12.10	5.05	-5.009	-59

Tableau III.4 : Paramètres caractéristiques d'un AWG à 32 canaux et 4nm d'espacement pour plusieurs valeurs du nombre de guides du réseau déphaseur.

Nos analyses ont abouti à plusieurs conclusions :

- Les pertes d'insertion sont un peu élevées quand le nombre de guides diminue, ces pertes sont dues principalement aux passages des ondes entre les guides et la région de propagation libre dans le coupleur d'entrée.
- La Propagation du faisceau incident au niveau du coupleur d'entrée se fait avec étalement de profil du champ incident à travers tous les guides de sortie et que ce faisceau doit être récupéré par ces mêmes guides avant qu'il puisse se réfléchir.
- Le profil du champ étant gaussien à l'entrée, il reste gaussien tout au long de la propagation mais sa largeur augmente au fur et à mesure de la propagation, ce faisceau sera équiphase à la sortie du coupleur de sortie.
- Si on recherche à la fois une résolution spectrale élevée et des pertes plus faibles, la configuration qui semble mieux répondre à ces critères est celle avec 100 guides. Cette configuration présente une résolution spectrale de 60.06 μm , qui est là plus adapter parmi les trois options, tout en ayant des pertes d'insertion de -5.0315 dB et une diaphonie de -43 dB, qui sont relativement faibles.

Conclusion générale

L'objectif de ce travail était la modélisation d'un AWG (Arrayed Waveguide Grating) pour les réseaux multiplexés.

Le dispositif AWG sert comme un multiplexeur-démultiplexeur dans les applications WDM optiques. Ce dernier est composé de trois parties principales : guide d'ondes d'entrée, un réseau de guides d'ondes dispersifs et un coupleur de sortie.

Pour mener à bien ce modeste travail, nous sommes tout d'abord passés par une étude théorique, qui nous a permis de se familiariser avec le sujet et de connaître la structure et la conception (design) du phasar étudié, ainsi que les paramètres caractéristiques pour son fonctionnement.

L'outil de conception WDM_Router du logiciel Rsoft a été utilisé pour concevoir deux types d'AWG à 16 et 32 canaux fonctionnant à une longueur d'onde centrale de $1,55 \mu\text{m}$, avec un espacement entre canaux de 8 nm et 4nm respectivement, ce qui correspond à une bande de fréquence de 100GHz et 50GHz, intervalle compatible pour les applications DWDM (multiplexage dense).

On a étudié l'influence du nombre du guide d'ondes dans le réseau de phase AWG sur les performances du phasar.

Nos analyses ont abouti à plusieurs constatations :

- ❖ Le calcul de la FSR (Free Spectral Range) joue un rôle essentiel dans l'optimisation et la conception du phasar en ajustant le nombre de guides d'onde.
- ❖ Les pertes d'insertion et la diaphonie sont des aspects importants à prendre en compte lors du choix ou la conception d'un AWG, tout comme le nombre de guides utilisés.
- ❖ Les pertes d'insertion mesurent la diminution de puissance du signal lorsqu'il traverse l'AWG.
- ❖ La diaphonie, quant à elle, mesure la fuite de puissance entre les différents canaux d'un AWG : une diaphonie plus faible indique une meilleure isolation entre les canaux et donc une meilleure séparation des signaux.
- ❖ Avoir des pertes d'insertion faibles tout en améliorant la séparation entre les canaux, cela implique une configuration avec un nombre de guides plus élevé.

Conclusion générale

En perspectives, nous comptons étudier l'influence des paramètres géométriques des coupleurs d'entrée et de sortie sur les caractéristiques du phasar.

Bibliographies & Webographies

- [1] Jean-Louis VERNEUIL, Simulation de systèmes de télécommunications par fibre optique à 40 Gbits/s, thèse de doctorat, université de LIMOGES, (2003).
- [2] Agrawal ;G.P, fiber-optic communication système. JhonWiley& Sons (2012).
- [3] www.exoco-lmd.com
- [4]http://www.wigm.univmlv.fr/~dr/XPOSE2007/rlefievr_Fibre_Optique_et_WDM/wdm_presentation.htm.
- [5] Joindot M., Joindot I., « Fibres optiques pour télécommunications», E7 110, 2000
- [6] F.Brik, "Optoélectronique", support de cours, université Badji mokhtar annaba, (2017).
- [7] <http://fr.fiber-optical-transceivers.com/>
- [8] <https://t8.ru/wp-content/uploads/2020/08/Basic-of-DWDM-1.png>
- [9] <https://i.ytimg.com/vi/JCGHHmS-efw/maxresdefault.jpg>
- [10] F.Brik, A.Labbani, "Optimization of a tunable photonic crystal filter for coarse wavelength division multiplexing", *J. Nano- Electron. Phys.* 12 N°6, 06035 (2020).
- [11] F.Brik et al, «Influences of different optogeometric parameters on the spectral response of optical fiber bragg grating ", 6th International Conference on Computational and Experimental Science and Engineering (ICCESEN-2019) 23-27 October 2019, Antalya, TURKEY.
- [12] M. C. Hutley, "Diffraction gratings", Academic Press, London, 1982
- [13] J. P. Laude, "DWDM Fundamentals , Components, and Applications", ISBN: 1- 58053- 177-6, Artech House, Boston, London, 2002.
- [14] *BeamPROP™* AWG Utility Version 2.1
- [15] A. Fares, K. Saouchi, **F. Brik** and N. Boukhatem, "8x30 Gbps RZ-RoF-WDM System Using Optical DSB-SC For Long-Distance Networks," *19th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD), Sétif* (2022), pp. 274-279,
- [16] https://www.researchgate.net/figure/Schematic-of-arrayed-waveguide-grating-1_fig1_250390631