

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS	i
TABLE DES MATIERES	iii
ABREVIATIONS ET NOTATIONS.....	ix
INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE 1 : ETAT DE L'ART	4
1.1 Information	4
1.1.1 Chaîne de transmission.....	4
1.1.1.1 Transducteur à l'émission.....	5
1.1.1.2 L'émetteur	5
1.1.1.3 Le canal de transmission.....	5
1.1.1.4 Le récepteur	7
1.1.1.5 Transducteur à la réception.....	7
1.1.2 Transmission en bande de base	8
1.1.3 Transmission en bande transposée	8
1.3 Spectre de la lumière visible	10
1.4 La propagation de la lumière.....	11
1.4.1 Définition de la lumière	11
1.4.2 La trajectoire de la lumière	11
1.4.3 La vitesse de la lumière dans le vide	11
1.5 Notions de base sur les photodiodes	12
1.5.1 Définition.....	12
1.5.2 Propriété.....	12
1.5.3 Fonctionnement	13

1.5.4 Temps de réponse de la photodiode	14
1.5.5 Application	15
1.5.6 Exemple de Montage de la photodiode	16
1.6 Énergie rayonnante et Grandeurs radiatives.....	17
1.7 Lois fondamentales de la radiation.....	21
1.8 Base de l'optique	24
1.8.1 Indice optique d'un milieu isolant et transparent	24
1.8.2 Lois de la réfraction.....	25
1.9 L'équation de Schrödinger.....	26
1.9.1 Interprétation de la fonction d'onde	26
1.9.2 Présentation de l'équation de Schrödinger	28
1.10 Conclusion.....	29
CHAPITRE 2 : GENERALITES SUR LES COMPOSANTS DU SYSTEME OPTIQUE	30
2.1 Introduction	30
2.2 Définition et historique de la fibre optique	30
2.3 Composants passifs	32
2.3.1 Constitution des fibres optiques	32
2.3.2 Caractéristiques générales de la fibre optique	33
2.3.2.1 Réflexion totale interne.....	33
2.3.2.2 Propagation de la lumière dans une fibre optique.....	34
2.3.3 Types de fibres optiques	35
2.3.3.1 Fibres monomodes	36
2.3.3.2 Fibres multimodes ou de classe A ou multimodales.....	36
2.3.3.3 Fibres micro-structurées.....	38
2.3.4 Dimension de la fibre optique	41

2.3.5 Affaiblissement lors de la propagation	42
2.3.6 Bande passante des fibres	44
2.3.7 Câbles à fibre optiques	45
2.3.8 Liaison optique : la connectique	46
2.3.8.1 Centrage géométrique des fibres.....	46
2.3.8.2 Raccordement permanent.....	47
2.3.8.3 Raccordement démontable	47
2.3.9 Coupleurs optiques	48
2.4 Composants actifs	49
2.4.1 Composants actifs au niveau de l'émetteur	49
2.4.1.1 Diodes ÉlectroLuminescentes ou LED	49
2.4.1.2 Diodes Laser	50
2.4.2 Composants actifs au niveau du récepteur	51
2.4.2.1 Photodiodes PIN	51
2.4.2.2 Photodiodes à avalanche	52
2.4.3 Amplificateurs optiques.....	53
2.4.3.1 Amplificateur optique à semi-conducteurs (ou AOSC)	54
2.4.3.2 Amplificateur optique à fibre dopée EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier)	55
2.4.3.3 Amplificateur de RAMAN.....	56
2.4.4 Evolution de la capacité des fibres optiques suivant les générations	57
2.4.4.1 Première génération	57
2.4.4.2 Deuxième génération	58
2.4.4.3 Troisième génération	58
2.4.4.4 Quatrième génération.....	58
2.5 Conclusion	59

CHAPITRE 3 : AMPLIFICATION A L'ERBIUM	60
3.1 Spectroscopie des Terres rares	60
3.1.1 Les ions Terres Rares	61
3.1.2 Principe	62
3.1.3 Emissions spontanée et stimulée	63
3.2 Laser à fibre dopée : aspects technologiques	65
3.3 Equations d'évolution	67
3.4.1 Equations d'évolution des densités volumiques de population	69
3.4.2 Equations d'évolution longitudinale de puissance	70
3.4.3 Equations d'évolution longitudinale de puissance	70
3.4.4 Taux de transition entre niveaux d'énergie	74
3.5 Paramètres d'une fibre dopée erbium	76
3.5.1 Facteur de recouvrement Γ	76
3.5.2 Durée de vie τ	77
3.5.3 Gain G	78
3.5.4 Puissance de saturation de la pompe	78
3.6 Milieu de gain de l'Erbium	79
3.6.1 Élargissement spectral de la transition	79
3.6.2 Systèmes à trois niveaux	81
3.6.3 Les sections efficaces d'absorption et d'émission	82
3.7 Conclusion	83
CHAPITRE 4 : MODELISATION DE L'EVOLUTION DU GAIN ET EVALUATION DE L'AMPLIFICATEUR DOPEE A L'ERBIUM	84
4.1 Modélisation de l'équation du gain	84
4.2 Interprétation de l'équation du gain	88

4.3 Etude du cas du régime petit signal	89
4.3.1 Interprétation de l'évolution du gain	90
4.3.2 Résultat de l'évolution du gain en régime petit signal	92
4.4 Longueur optimale pour l'optimisation.....	93
4.5 Efficacité de conversion quantique et efficacité de conversion de la puissance de pompe	94
4.6 Comparaison de la modélisation mathématique à la représentation de l'évolution du gain sur le logiciel Matlab.....	95
4.6.1 Etude du 1 ^{er} Cas où $P_p=100$ mW et $\lambda = 980nm$	96
4.6.1.1 Paramètres de l'amplificateur	96
4.6.1.2 Interprétations de la performance de l'amplificateur.....	96
4.6.2 Etude du 2 ^{ème} Cas où $P_p=250$ mW et $\lambda = 1064nm$	97
4.6.2.1 Paramètres de l'amplificateur	97
4.6.2.2 Interprétation.....	98
4.7 Evolution du gain dans une fibre dopée à l'erbium, cas du régime petit signal.....	99
4.7.1 Paramètre	99
4.7.2 Interprétation	99
4.8 Conclusion	100
CONCLUSION	101
ANNEXES	104
Annexe 1 : Publication de notoriété nationale	104
Annexe 2 : Les bases de la lumière	111
A2.1 Interactions lumière matière.....	111
A2.2 Inversion de population et pompage	112
A2.3 Systèmes à trois niveaux	112
A2.4 Structure vitreuse des fibres optiques standards	113

Annexe 3 : Équations spatio-temporelles	115
A3.1 Taux de transitions	115
A3.2 Laser à trois niveaux	115
A3.3 Facteur de confinement	116
A3.4 Caractéristiques des fibres dopées NPs: cas de l’Erbium	116
A2.5 Evolution du % paires Er	118
A2.6 Exemple d’amplification à l’erbium	118
Annexe 4 : Code Matlab.....	119
BIBLIOGRAPHIES	124

ABREVIATIONS ET NOTATIONS

1. Minuscules latines

a	Variante selon la caractéristique de la fibre
c	Célérité de la lumière
e	Charge de l'électron
f	Fréquence
h	Constante de Plank
i	Intensité du courant
k	Constante de Boltzmann
n	Indice de réfraction
q	Charge électronique
r	Résistance
v	Tension

2. Majuscules latines

A	Ampère
B	Bande passante
D	Dispersion chromatique
E	Champ électrique
L	Longueur de la fibre
M	Coefficient multiplicateur Photodiode
P	Puissance
Q	Facteur de qualité

R	Résistance ou charge
S	Coefficient de conversion
T	Température
W	Watt

3. Minuscule grecque

γ	Angle d'incidence
η	Rendement quantique
ν	Fréquence Optique
v	Vitesse de la lumière dans un matériau
λ	Longueur d'onde ω Vitesse angulaire

4. Majuscule grecque

Δ	Différence d'indice normalisée
Θ	Angle de réflexion interne
Θ_c	Angle critique
Φ	Ouverture numérique

5. Abréviations

3D	Trois dimensions
1G	Première Génération
2G	Deuxième Génération
3G	Troisième Génération
3GPP	3rd Generation Partnership Project
4G	Quatrième Génération

5G	Cinquième Génération
ACK	Acknowledge
ADS	Advanced Design Systems
ADSL	Asymmetric Digital Subscriber Line
AMPS	Advanced Mobile Phone System
AOSC	Amplificateur Optique à Semi-Conducteurs
ASK	Amplitude Shift Keying
ASE	Amplified spontaneous emission
BER	Bit Error Rate
B-ISDN	Broadband Integrated Services Digital Network
BLR	Boucle Locale Radio
BS	Base Station
CAN	Convertisseur Analogique Numérique
COMSIS	COMmunication System Interactive Software
CPL	Courant Porteurs en Ligne
CS	Central Station (headend)
CSMA	Carrier Sense Multiple Access
CSMA/CA	CSMA with Collision Avoidance
CSMA/CD	CSMA with Collision Detected
DAS	Distributed Antenna Systems
dB	Décibel
DCF	Dispersion Compensation Fiber
DEL	Diode ElectroLuminescente

DR	Dynamic Range
EAM	Erbium Absorption Modulator
ECP	Efficacité de Conversion de Puissance
EDFA	Erbium Doped Fiber Amplifie
EDGE	Enhanced Data Rates for GSM Evolution
E/O	ElectroOptique
ETDMA	Electrical Time Division Multiplexing Access
FDDI	Fiber Distributed Data Interface
FDMA	Frequency Division Multiple Access
FM	Frequency Modulation
FWM	Four-Wave Mixing
Gbit/s	Gigabit par seconde
GHz	GigaHertz
GPRS	General Packet Radio Service
GSM	Global System for Mobile Communication
HSDPA	High Speed Downlink Packet Access)
HSUPA	High Speed Uplink Packet Access).
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IF	Intermediate Frequency
IM-DD	Intensity Modulation- Direct Detection
IrDA	InfraRed Data Association
IOE	Interface Optique d'Emission
IOR	Interface Optique de Réception

IP	Internet Protocol
ISM	Industrial, Scientific and Medical
ISO	International Standard Organization
km	kilomètre
LAN	Local Area Network
LASER	Light Amplification by Simulated Emission of Radiation
LED	Light Emitting Diode
LNA	Low Noise Amplifier
LTE	Long Term Evolution
mA	Milli-Ampère
MEA	Modulateur Electro-Absorption
MMF	MultiMode Fiber
MHz	MégaHertz
mW	MilliWatt
MVDS	Multipoint Video Distributing System
MZM	Mach-Zender Modulator
NF	Noise Figure nm Nanomètre
NMT	Nordic Mobile Telephone
OCDMA	Optical Code Division Multiplexing Access
O/E	OptoElectrique
OFLL	Optical Frequency-Locked Loop
OIL	Optical Injection Locking
OIPLL	Optical Injection Phase-Locked Loop

ON	Ouverture Numérique
OOK	On-Off Keying
OPLL	Optical Phase-Locked Loop
OTDMA	Optical Time Division Multiple Access
P2P	Point to Point
PAN	Personnal Area Network
PCE	Power Conversion Efficiency
PCF	Photonic Crystal Fiber
PDA	Personnal Digital Assistant
PDA	PhotoDiode Avalanche
PIN	P-Intrinsic-N diode
PON	Passive Optical Networks
PSK	Phase Shift Keying
QCE	Quantum Conversion Efficiency
RAU	Remote Antenna Unit
RF	Radio Fréquence
RHD	Remote Heterodyning Detection
RIN	Relativite Intensity Noise
RoF	Radio-over-Fiber
RTC	Réseau Téléphonique Commuté
SCM	Sub-Carrier Multiplexing
SMF	Single Mode Fiber
SPM	Self-Phase Modulation

SNR	Signal to Noise Ratio
TACS	Total Access Communication System
THz	TéraHertz
UMTS	Universal Mobile Telecommunication System
xDSL	Digital Subscriber Line
XPM	Cross Phase Modulation
WAN	Wide Area Network
W-CDMA	Wideband Code Division Multiple Access
WDM	Wave Division Multiplexing
WDMA	Wavelength Division Multiple Access
Wi-Fi	Wireless Fidelity
WiMax	Worldwide Interoperability for Microwave Access
WLAN	Wireless Local Area Network

INTRODUCTION

Il n'y a pas si longtemps, lorsque les systèmes numériques les plus rapides transmettaient l'information à un débit de 270 Mbits/s, le câble coaxial était parfaitement à même de remplir son rôle de support de transmission. Mais avec l'apparition des nouveaux services liés au développement du multimédia, un besoin d'un débit de transmission d'informations plus élevé est apparu, et une alternative au câble coaxial était à trouver : pertes trop élevées, courtes distances de propagation, performances limitées. La fibre optique remplit très bien ce rôle de support de transmission. Son utilisation est désormais courante dans les réseaux de télécommunications.

Mais aujourd'hui, l'essor de l'Internet est tel que l'évolution des systèmes de télécommunications tend toujours vers une augmentation des capacités de transmission. La difficulté majeure ne réside plus vraiment sur le support, possédant une large bande passante et de faibles atténuations, mais sur les modules d'émission et de réception, regroupant l'électronique rapide et les fonctions optoélectroniques.

Jusqu'au début des années 90, l'amplification dans les lignes longues distances était assurée par des dispositifs optoélectroniques qui nécessitaient une conversion électrique-optique en entrée et optique-électrique en sortie ce qui limitait le débit des réseaux à celui des répéteurs-régénérateurs 2Gbit/s au mieux.

L'avènement des amplificateurs à fibre optique dopée aux terres rares et en particulier à l'erbium (EDFA pour Erbium Doped Fiber Amplifier) a rendu possible. Cependant les EDFA fonctionnent dans la troisième fenêtre des télécommunications optiques autour de 1,55 μm , longueur d'onde qui coïncide bien avec le minimum d'atténuation linéique des fibres alors que la plupart des réseaux installés sont constitués de fibres monomodes optimisées à 1,30 μm , longueur d'onde pour laquelle leur dispersion chromatique est quasi nulle. La mise en œuvre des EDFA a donc nécessité l'insertion au sein des lignes de transmission de modules réalisant la compensation de la dispersion chromatique des fibres optiques qui est de l'ordre de 17 ps/(nm.km) à 1,55 μm .

Un avantage des EDFA est le fait qu'ils présentent une bande spectrale d'amplification de 30 à 40 nm. Il est donc possible d'amplifier simultanément plusieurs canaux de longueurs d'onde voisines dans cette plage sur une même fibre. Cette technique appelée multiplexage en longueur d'onde ou WDM (Wavelength Division Multiplexing) permet de multiplier le débit des réseaux de télécommunications par le nombre de canaux. Cependant le positionnement, l'ordre des modules d'amplification et de compensation de dispersion chromatique au sein de la ligne

engendrent des problèmes d'optimisation en termes de qualité de réception des signaux transportés. En effet la dégradation du signal varie selon le type de compensation utilisé. En outre, le besoin de limiter les coûts de production, l'encombrement et le poids des lignes ont suscité l'intérêt de développer une fibre optique capable de réaliser à la fois les fonctions d'amplification et de compensation de dispersion.

La nécessité d'une étude approfondie afin d'optimiser l'amplification à l'erbium s'avère cruciale d'où nous proposons les problématiques suivantes.

Problématiques :

- *Le gain au niveau d'une amplification à l'erbium reste un domaine imprécis. Or la nécessité des résultats précis est indispensable pour une optimisation maximum du réseau.*
- *Comment utiliser efficacement les amplificateurs à l'erbium en fonction des paramètres intervenant dans l'évolution du gain ?*

Tous les problèmes cités précédemment nous ont poussés à creuser d'avantage et à optimiser l'amplification à l'erbium d'où le choix de notre sujet de mémoire : « CARACTERISATION DU GAIN ET ETUDE PARAMETRIQUE DE LA FIBRE DOPEE A L'ERBIUM A DES FINS D'OPTIMISATION ».

Ainsi ce mémoire se propose d'atteindre les objectifs suivants :

- *Trouver l'équation du gain.*
- *Modéliser l'amplification à l'erbium en fonction de l'équation du gain.*
- *Modéliser l'amplification à l'erbium en fonction de l'équation du gain dans le cas petit signal pour une déduction de la valeur de saturation de l'amplificateur.*
- *Simuler sous Matlab l'équation du gain de l'amplification à l'erbium pour comparer les résultats obtenus.*

Le principe de notre projet est de pouvoir déterminer les caractéristiques d'une fibre optique dopée à l'erbium moyennant l'équation du gain, tel que la puissance de saturation, la durée de vie et la section efficace d'absorption afin de concevoir des amplificateurs optiques plus performant qui nous permettrons de répondre à la demande des différents secteurs d'activités du haut débit. Ces travaux effectués sur le logiciel de simulation Matlab définissent le sujet de ce mémoire. Ils ont porté sur une volonté omniprésente de trouver l'équation d'évolution du gain et de simuler avec le plus de réalisme possible des systèmes de transmission à l'erbium et les différents composants les constituant, afin de mesurer les performances attendues d'une telle liaison. Pour cela, une caractérisation des différents éléments constitutifs était nécessaire et l'analyse de plusieurs techniques était indispensable. Une optimisation de la liaison pouvait ensuite être recherchée et l'impact des différents composants sur les performances évaluées.

Afin de mener à bien une étude approfondie de l'amplification à l'erbium, notre étude sera structurée en quatre chapitres :

Le premier chapitre de ce mémoire décrira les structures des réseaux de télécommunications, ainsi que les bases indispensables pour une transmission. Cette description aidera le lecteur par la suite à comprendre la constitution d'une liaison sur la fibre optique.

Le second chapitre détaillera l'ensemble des composants présents dans une liaison optique et expliquera leur fonctionnement des composants optoélectroniques.

Le troisième chapitre sera consacré à la présentation de l'amplification à l'erbium et à la description des différents critères de qualité, et à la présentation des caractéristiques générales des fibres dopées à l'erbium.

Enfin sera venu le temps de présenter l'ensemble des résultats sur la recherche des équations de base d'une amplification à l'erbium et d'une simulation sous Matlab pour optimiser le système de transmission.

CHAPITRE 1 : ETAT DE L'ART

1.1 Information

L'information est un concept physique nouveau qui a surgi dans un champ technologique. Le concept théorique d'information a été introduit à partir de recherches théoriques sur les systèmes de télécommunication. L'origine de ces recherches remonte aux études entreprises dès la fin du XIX^e siècle, en physique et en mathématique par Boltzmann et Markov sur la notion de probabilité d'un événement et les possibilités de mesure de cette probabilité.

L'information est au cœur de nos sociétés modernes : presse, téléphonie, données météorologiques, Internet... De nombreux vecteurs concourent à nous transmettre les messages porteurs de ces informations. Les machines associées à des outils informatiques sont elles aussi soumises à un flux de données provenant de capteurs susceptibles d'améliorer leur performance et leur sécurité. Les flux d'information sont ainsi omniprésents dans notre quotidien.

Au-delà du traitement qui est fait de ces informations tant par l'humain que par la machine, il importe avant tout que celle-ci soit communiquée en toute fidélité à son destinataire. En d'autres termes, il faut impérativement que le message reçu soit l'exacte réplique du message émis.
[1.01]

1.1.1 Chaîne de transmission

La chaîne de transmission de l'information, dans sa structure fonctionnelle la plus simple, est constituée d':

- Un émetteur ;
- Un canal de transmission ;
- Un récepteur.

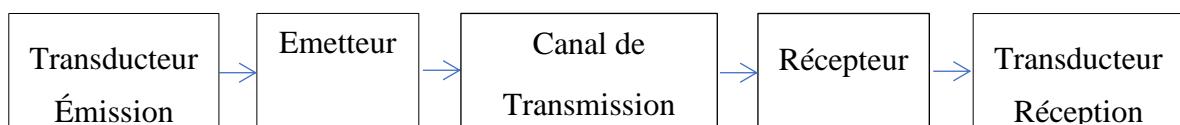


Figure 1.01 : Principe de la chaîne de transmission de l'information

Par analogie avec l'humain, l'émetteur « parle » au récepteur en utilisant le canal de transmission. Pour se comprendre, ils doivent aussi utiliser la même « langue ».

1.1.1.1 Transducteur à l'émission

Le transducteur à l'émission permet de convertir le signal original (voix, image, ...) en un signal électrique utile pour l'émetteur. Certains utilisent le terme « encodeur » (codec dans le jargon informatique), cela peut induire une confusion avec le convertisseur utilisé dans le canal de transmission qui réalise la conversion de la nature du signal (pour la voix : de pression en tension avec un microphone). [1.01] [1.02]

Transducteur	Signal original
Microphone	Voix humaine
Clavier	Touche pressée
Capteur CCD	Mouvement objet
Thermocouple	Mesure de température

Tableau 1.01 : Transducteur à l'émission

Son choix doit être compatible avec les caractéristiques (amplitude, spectre) du signal à convertir.

1.1.1.2 L'émetteur

L'émetteur a pour fonction d'adapter le signal issu du transducteur en vue de le transmettre au canal de transmission. Il peut simultanément remplir plusieurs fonctions [1.02] :

- Coder le signal issu du transducteur (tension) en nombres, dans le cas d'une conversion analogique numérique ou/et de chiffrage ;
- Moduler ;
- Amplifier.

Cet émetteur peut être un émetteur analogique (exemple : émetteur radio FM) ou encore un modem ADSL utilisé pour Internet dans le cadre d'une information numérique. [1.02] [1.03]

1.1.1.3 Le canal de transmission

Le canal de transmission permet au récepteur de recevoir l'information émise par l'émetteur.

De nombreux supports sont utilisés :

- Les supports avec guide physique (câbles, fibres, ...) ;
- Les supports sans guide physique (ondes radio, ondes lumineuses).

Ces différents supports sont choisis en prenant en compte :

- Le débit d'information à transmettre ;
- Les caractéristiques du signal (bande passante, codage...) ;
- La distance entre l'émetteur et le récepteur ;
- Les possibilités de mise en œuvre.

Pour donner une idée de la qualité des supports, écrivons que [1.03] :

- Les câbles électriques à paires torsadées sont les moins fiables, suivis par les câbles coaxiaux ;
- Les fibres optiques offrent actuellement le meilleur compromis fiabilité/performance.

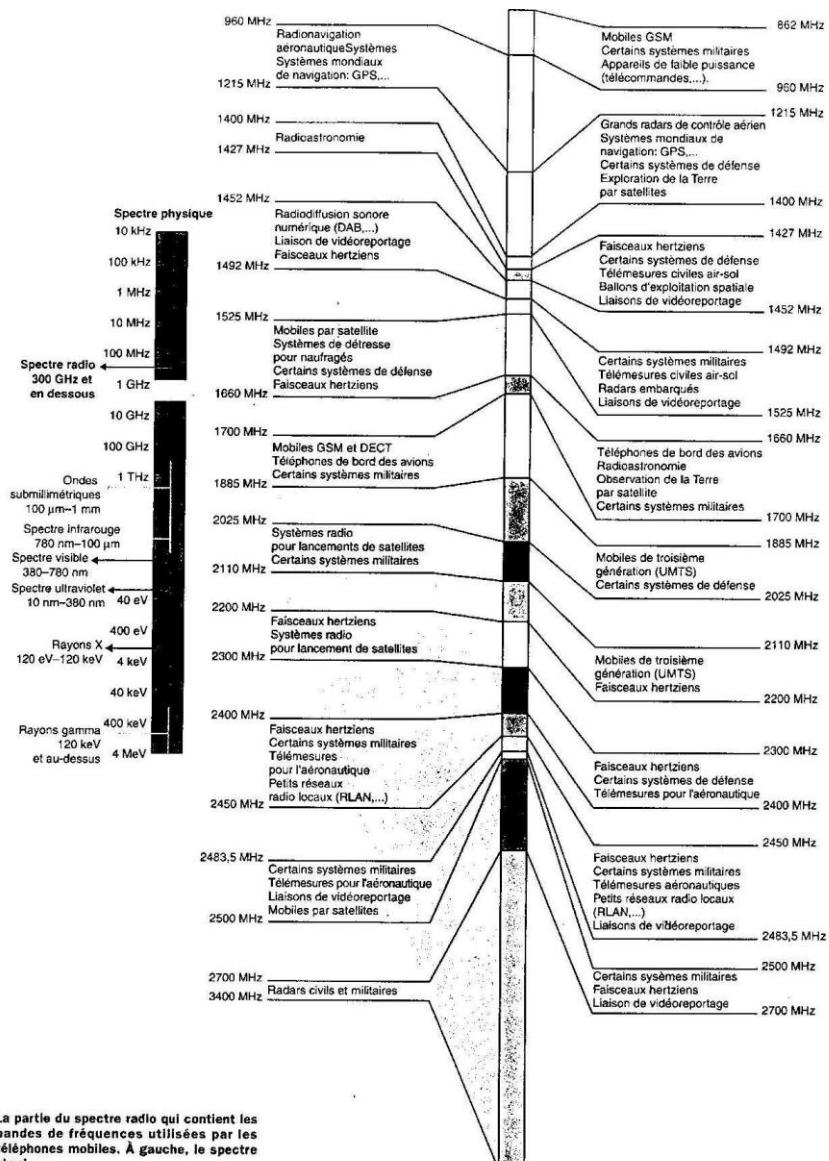


Figure 1.02 : Domaine du spectre des communications

1.1.1.4 Le récepteur

Son rôle est à la fois de recevoir le signal émis ainsi que de le rendre compatible avec le transducteur (exemple : haut-parleur) servant à la réception. [1.03] [1.04]

Les actions réalisées par le récepteur sont alors les suivantes :

- Filtrer le signal reçu (éliminer la partie inutile du signal reçu pour ne garder que l'information) ;
- Décoder :
 - Soit en réalisant une conversion numérique analogique ;
 - Soit un déchiffrage ;
- Démoduler ;
- Amplifier le signal pour le rendre utilisable par le transducteur de sortie.

Ce récepteur est par exemple un poste de radiophonie pour un signal analogique ou un modem ADSL pour les informations numériques.

1.1.1.5 Transducteur à la réception

Son rôle est de fournir une information exploitable par le destinataire sous la forme d'un signal.

Transducteur	Information
Haut-parleur	Son
Ecran	Image
Signal de commande	Commande actionneur (vanne, pompe)

Tableau 1.02 : Exemple de Transducteur

Il ne faut pas confondre le terme transducteur avec celui de décodeur qui a pour but de déchiffrer un signal crypté en une information « claire ». [1.04]

La question de la modulation se pose lorsque :

- L'on veut faire passer plusieurs informations simultanément dans le même canal de transmission ;
- L'on veut transmettre l'information à des distances importantes ;
- L'on veut diminuer le bruit dont est victime l'information lors de sa transmission.

La modulation consiste alors à adapter l'information à transmettre à un canal de communication mais ce n'est pas une obligation.

Moduler, c'est le moyen de séparer des informations provenant de différentes sources et ayant le même spectre qui utilisent le même support de transmission de façon à permettre à différents émetteurs de retrouver l'information qui les concerne.

1.1.2 Transmission en bande de base

La transmission en bande de base consiste à transmettre directement le signal sur le support sans transposition de fréquence. [1.04] [1.05]

Cela peut se faire par exemple pour des signaux numériques en utilisant un modem dit à bande de base. Celui-ci utilise directement des supports physiques de types métallique (paires torsadées ou câble coaxiaux) ou fibre optique.

Dans la plupart des cas, les harmoniques supérieures à un certain rang peuvent ne pas être transmises sans qu'on note une altération inacceptable du signal. Les harmoniques d'un signal transmis sur une ligne sont diversement atténués, suivant leur fréquence, par la bande passante de la ligne. Si l'ensemble des harmoniques utiles du signal à transmettre se situent dans la bande passante de la ligne que l'on souhaite utiliser, on peut appliquer ce signal directement à l'entrée de la ligne. Il sera transmis sans atténuation notable à l'autre extrémité.

Les inconvénients majeurs de ce mode de transmission sont ;

- Sensibilité aux parasites (bruits en $1/f$)
- Coût élevé pour la transmission sur fibre optique ou câble coaxial ;
- Impossibilité de partage direct d'un même canal par plusieurs sources (on ne peut pas suivre plusieurs conversations à la fois) ;
- Impossibilité de transmission à l'air de signaux basse fréquences (exemple : le son dont les fréquences vont de 20 à 20 kHz soit des longueurs d'onde de 15 à 15000 km).

1.1.3 Transmission en bande transposée

La transmission en bande transposée dite aussi modulation consiste à transmettre le signal de l'information en lui faisant subir une modification préalable de son spectre. [1.05]

La modulation utilise deux signaux :

- Le signal modulant de basse fréquence qui contient l'information et qui peut être analogique (voix) ou numérique (données informatiques) ;
- Un signal porteur de haute fréquence dont l'un des paramètres (amplitude, fréquence, phase) varie en fonction des évolutions du signal modulant.

Il ne s'agit pas ici de décrire les principes de mise en œuvre de ces modulations mais de donner quelques informations succinctes pour comprendre le principe de la modulation. Il existe différents modes de modulation qui peuvent consister à réaliser :

- Soit une transposition plus ou moins directe du spectre du message vers les hautes fréquences (modulation d'amplitude, de fréquence) ;
- Soit une modification radicale du signal lui-même en utilisant des moyens numériques, notamment l'échantillonnage (modulation par impulsions) ;
- Soit une combinaison des deux techniques précédentes (Wide Band Code Division Multiple Access - W-CDMA).

L'usage de la modulation permet ainsi de :

- Diminuer les longueurs d'onde de signaux transmis (exemple : une fréquence de 100 MHz correspond à une longueur d'onde de 3,00 mètres) ;
- Diminuer la présence de bruit lors de la transmission ;
- Transmettre de signaux par voie hertzienne (exemple : la radio) ;
- Transmettre simultanément sur le même support plusieurs informations sans « télescopage » par multiplexage fréquentiel.

Sa mise en œuvre est toutefois :

- Plus complexe : risque d'augmentation de la dégradation du signal due aux équipements ;
- Plus consommatrice de bande passante que pour le message d'origine. La bande de fréquences à l'émission est plus importante que celle du message d'origine (transposition vers les hautes fréquences).

1.3 Spectre de la lumière visible

La lumière visible fait partie d'un ensemble plus général, les ondes électromagnétiques. Ces ondes résultent d'un champ électrique et magnétique. Elles peuvent se propager dans des milieux transparents, comme l'air ou le vide. Toutes les ondes électromagnétiques se propagent dans le vide avec la même célérité, de valeur [1.05] [1.06] :

$$C = 299\,792\,458 \text{ m/s} \approx 3.10^8 \text{ m/s} \quad (1.01)$$

Il existe des différents types d'ondes électromagnétiques, ayant des propriétés très différentes. On peut les trier selon leur fréquence f , mais dans la pratique on préfèrera manipuler leur longueur d'onde. Ces grandeurs sont liées par la relation :

$$\lambda = c \cdot T = \frac{c}{f} \quad (1.02)$$

La longueur d'onde λ s'exprime en mètre, la célérité c en mètre par seconde, la période T en seconde, et la fréquence f en Hertz (s^{-1}). [1.06]

Le spectre des ondes électromagnétiques se présente sous la forme :

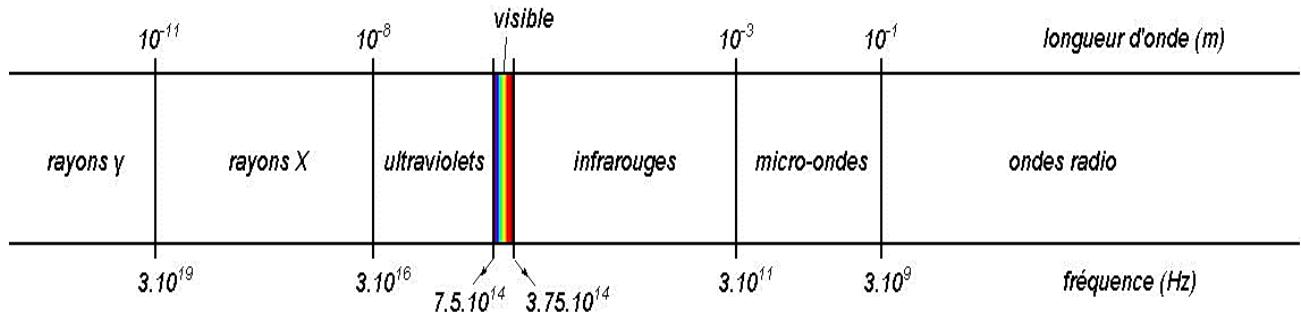


Figure 1.03 : Spectre des ondes électromagnétiques

Le visible ne constitue qu'une infime partie des radiations possibles. En se focalisant sur cette zone, en retrouve le spectre obtenu en décomposant la lumière blanche, avec un prisme, ou lors d'un arc en ciel :

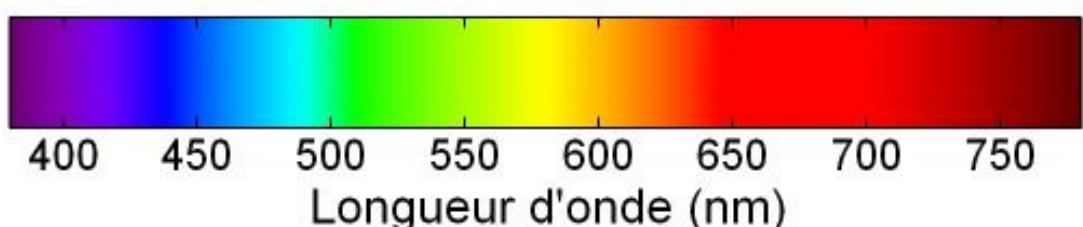


Figure 1.04 : Spectre de la lumière visible

On admet que le visible se situe entre 380 et 780 nm, soit environ 400-800 nm.

1.4 La propagation de la lumière

1.4.1 Définition de la lumière

La lumière est une onde électromagnétique caractérisée par une fréquence comprise entre $3,8 \times 10^{14}$ Hz et $7,8 \times 10^{14}$ Hz. Elle correspond donc à la propagation de champs électriques et magnétiques dans le vide et certains milieux matériels. [1.07]

1.4.2 La trajectoire de la lumière

Dans le vide la lumière se propage toujours de manière rectiligne en suivant une droite c'est pourquoi on représente son trajet par un rayon lumineux en théorie en la représente avec une droite comportant une flèche.

Dans un milieu matériel seul certains matériaux qualifiés de transparents laissent la lumière se propager. Dans un milieu transparent la propagation de la lumière n'est alors rectiligne que si ce dernier est homogène. Un milieu est homogène s'il possède les mêmes caractéristiques en chacun de ses points comme la même composition chimique, même température et même pression. [1.07]

1.4.3 La vitesse de la lumière dans le vide

Dans le vide la lumière se propage à une vitesse constante de 300 000 km/s. Cette vitesse, aussi appelée célérité se note c et correspond aussi à la vitesse de propagation de toutes les autres ondes électromagnétiques comme les ondes radios, micro-ondes, infrarouge, etc. Nous pouvons prendre alors la valeur de la célérité $c = 300 000$ km/s. [1.07]

La vitesse de la lumière est différente dans un milieu matériel transparent car dans un milieu transparent la lumière peut se propager moins vite que dans le vide. La vitesse de propagation s'exprime alors à l'aide de la relation suivante :

$$v = \frac{c}{n} \quad (1.03)$$

Où

v : la vitesse de la lumière dans le milieu transparent (en mètre par seconde)

c : est la célérité de la lumière dans le vide ($c = 300\,000\,000$ m/s)

n : est l'indice de réfraction

L'indice de réfraction est caractéristique de chaque type de milieu transparent. n est toujours supérieur ou égale à 1. Dans l'air $n \approx 1$ ce qui signifie que la vitesse de propagation est presque la même que dans le vide.

Par contre dans l'eau $n = 1,33$ et dans le verre $n = 1,5$ donc dans ces milieux la lumière se propage moins vite que dans le vide. [1.07]

1.5 Notions de base sur les photodiodes

1.5.1 Définition

Une photodiode est un composant semi-conducteur ayant la capacité de détecter un rayonnement du domaine optique et de le transformer en signal électrique. [1.08]

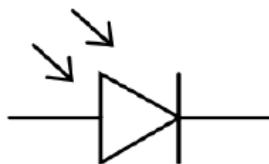


Figure 1.05 : Symbole de la photodiode

1.5.2 Propriété

Le matériau de base pour la fabrication des photodiodes sensibles dans le domaine visible ou le proche infrarouge, est le silicium. La structure PIN est la plus répandue. Elle consiste à intercaler entre la zone N et la zone P, d'une jonction PN classique, une zone intrinsèque "I" ou très faiblement dopée. [1.08]

L'intérêt d'une telle structure réside, pour les fabricants, dans le fait qu'il est possible de résoudre au mieux le compromis sensibilité-rapidité en jouant sur les caractéristiques de cette zone I.

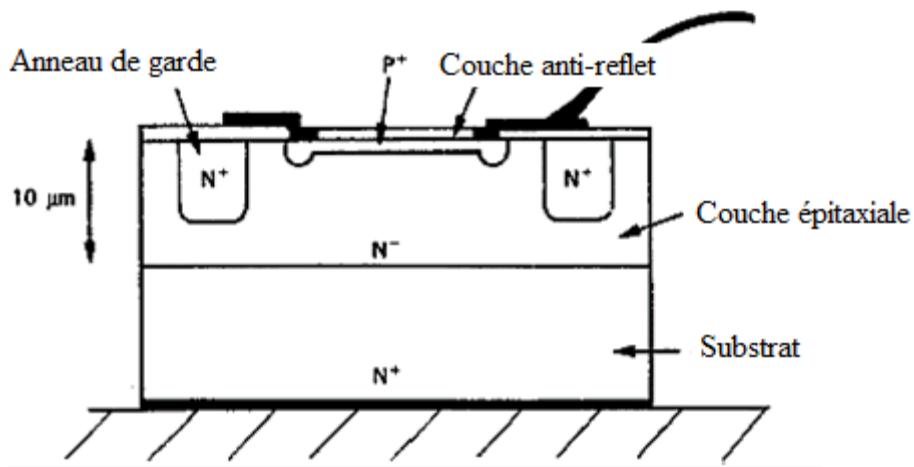


Figure 1.06 : Coupe d'une photodiode

Comme nous pouvons visionner sur la coupe d'une photodiode PIN au silicium, obtenue par épitaxie d'une couche résistive (N-) et diffusion localisée d'une mince zone fortement dopée (P+), qui après les opérations de métallisation, est recouverte d'une couche anti-reflet. [1.08]

1.5.3 Fonctionnement

En l'absence d'éclairement, le courant qui traverse la jonction est uniquement d'origine thermoïonique. Il est appelé courant d'obscurité ID (dark current). Sous éclairement, le bombardement photonique provoque la génération de paires électrons trou au voisinage de la jonction, qui conduisent à l'accroissement du courant inverse :

$$IR = ID + IP \quad (1.04)$$

Il est à noter que ce courant est proportionnel à l'intensité du flux incident. De tels dispositifs peuvent donc être utilisés pour la mesure quantitative de la lumière.

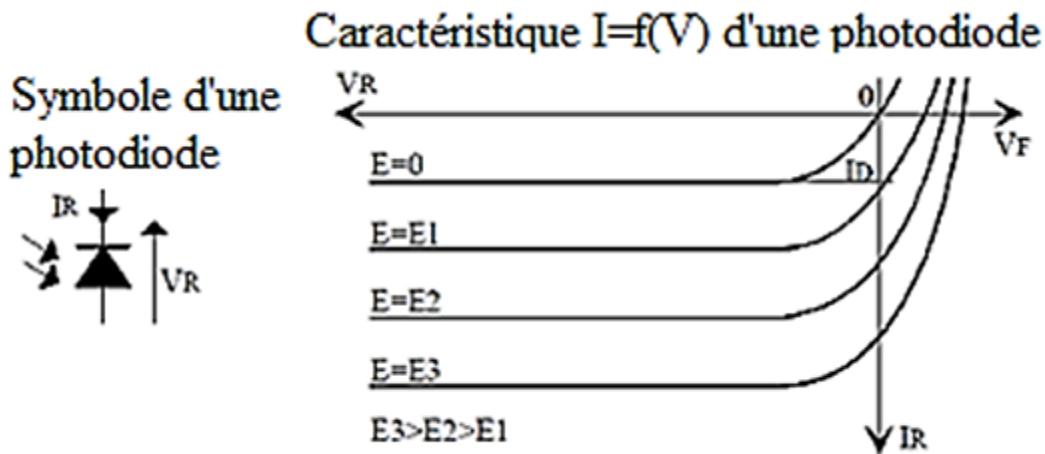


Figure 1.07 : Caractéristique d'une photodiode

Les photodiodes se présentent sous des boîtiers variés (rond $D = 5\text{mm}$, TO-92, TO-5 métallique, CMS ...), qui permettent bien sûr la traversée au flux incident vers la jonction. Certains de ces boîtiers sont équipés de filtres optiques, essentiellement des filtres infrarouges. Ces filtres infrarouges augmentent la sélectivité spectrale des photodiodes dédiées aux applications utilisant des diodes électroluminescentes infrarouges. [1.08]

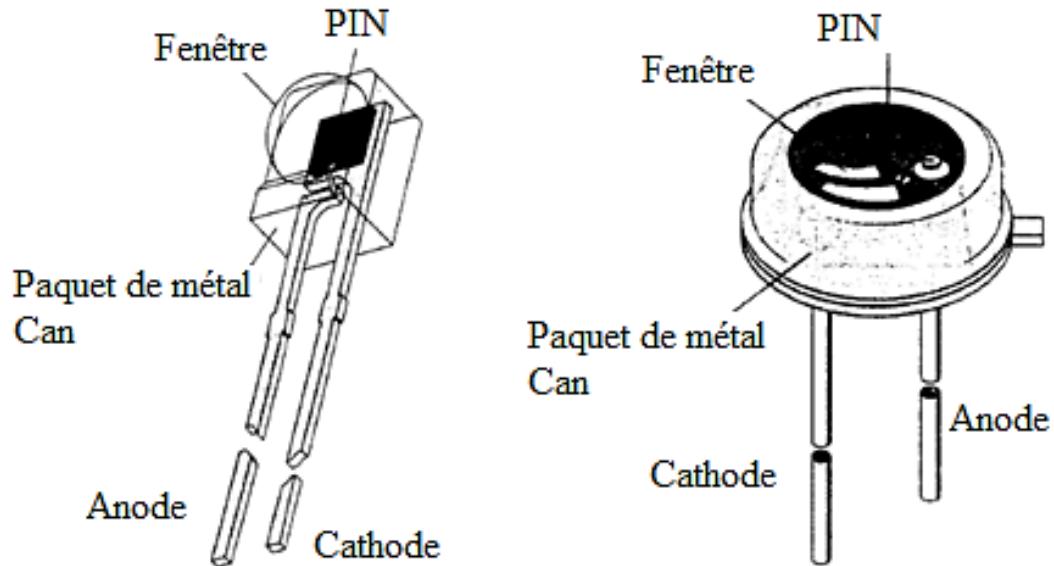


Figure 1.08 : Architecture d'une photodiode

Une photodiode possède plusieurs modes de fonctionnement, suivant la structure du circuit, dans lequel elle est placée. La photodiode est polarisée en inverse. Le courant inverse IR est alors proportionnel au flux incident E , au courant d'obscurité ID près. Les avantages de cette polarisation sont l'obtention d'une bonne linéarité, des temps de réponse courts et une bande passante étendue. [1.08] [1.09]

1.5.4 Temps de réponse de la photodiode

La photodiode est un composant rapide, ce qui impose l'emploi d'une source lumineuse rapide pour tester son temps de réponse. Dans cette expérience quantitative, on ne pourra qu'établir une limite supérieure sur le temps de réponse. Une diode électroluminescente à forte luminosité convient à cette expérience. Choisir impérativement une DEL rouge de haute luminosité. [1.09]

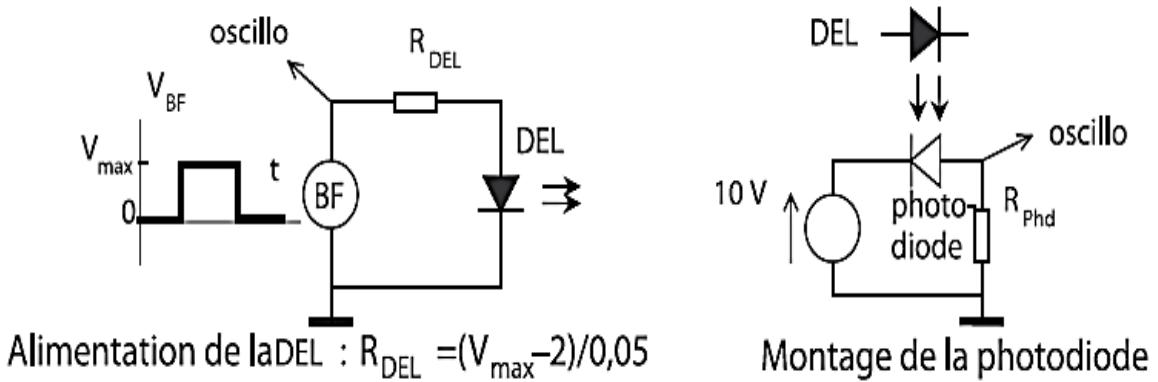


Figure 1.09 : Montage de la photodiode

La figure de gauche indique comment alimenter la diode électroluminescente (DEL) :

- La photodiode ne supporte pas les tensions négatives : utiliser des signaux carrés avec décalage,
- La photodiode supporte des courants de 50 mA au maximum et la tension à ses bornes lorsqu'elle éclaire vaut approximativement 2 V. Donc pour contrôler le courant qui la traverse il faut choisir $V_{MAX} >> 2V$ et prendre R_{DEL} en conséquence (on réalise ainsi un générateur de courant).

Enfin vérifier que le temps de montée des signaux carrés données par le générateur BF ne dépasse pas 0,1 μ s, sinon prendre un autre BF. [1.09]

1.5.5 Application

En association avec une LED infrarouge, les utilisations les plus courantes sont dans la communication et la robotique avec le cas du suiveur de ligne (ligne noire sur fond blanc) ou de la détection d'obstacle sur de courtes distances. L'utilisation des photodiodes est représentée dans le tableau suivant. [1.09]

Les caméras	Médical	Communication	Industrie	Equipement de sécurité
Autofocus Le contrôle du flash	Analyse des particules de sang Scanneur X	La liaison des fibres optique Communication sur onde visible (Li-Fi) Les télécommandes	Scanneur des codes-barres	Détecteur de la fumée

Tableau 1.03 : Application des photodiodes

1.5.6 Exemple de Montage de la photodiode

Montage d'une photodiode dans un circuit de trans-impédance

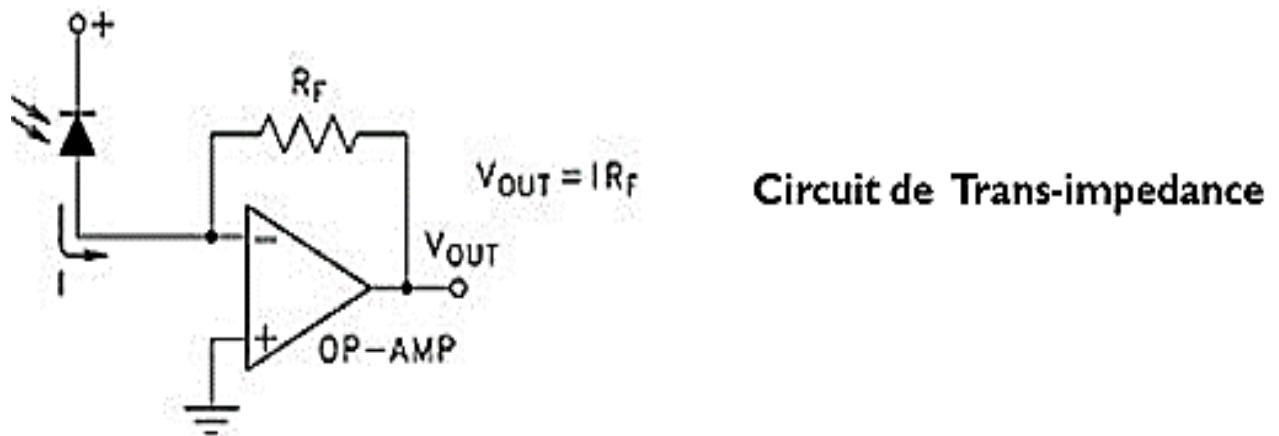


Figure 1.10 : Montage d'un circuit Trans-impédance

Montage d'une photodiode dans un circuit de mesure de la lumière

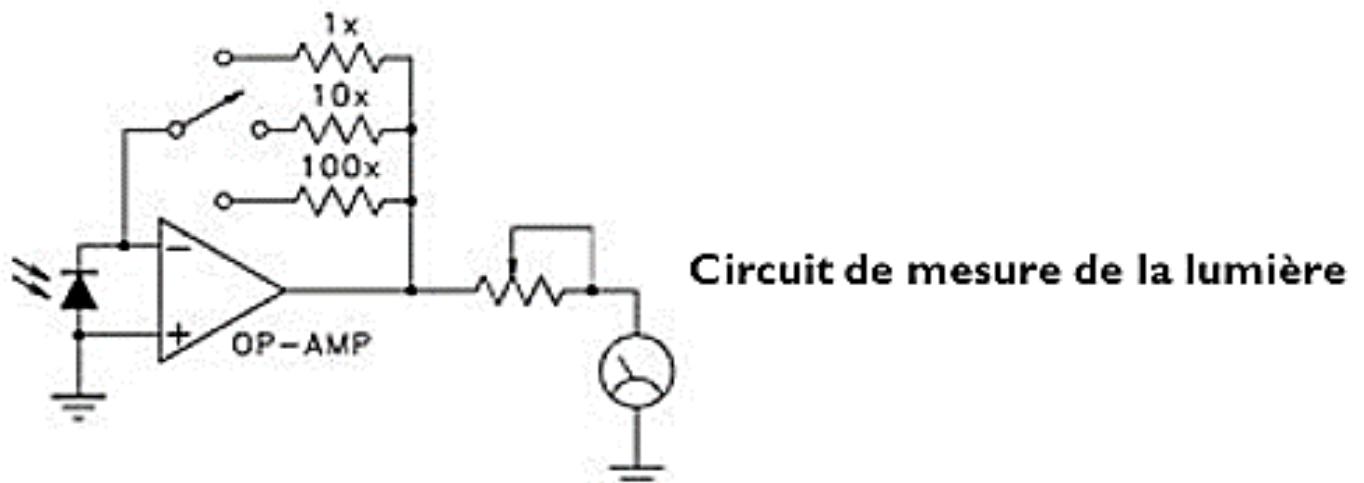


Figure 1.11 : Montage d'un circuit de mesure de la lumière

Montage d'une photodiode dans une transmission par onde visible

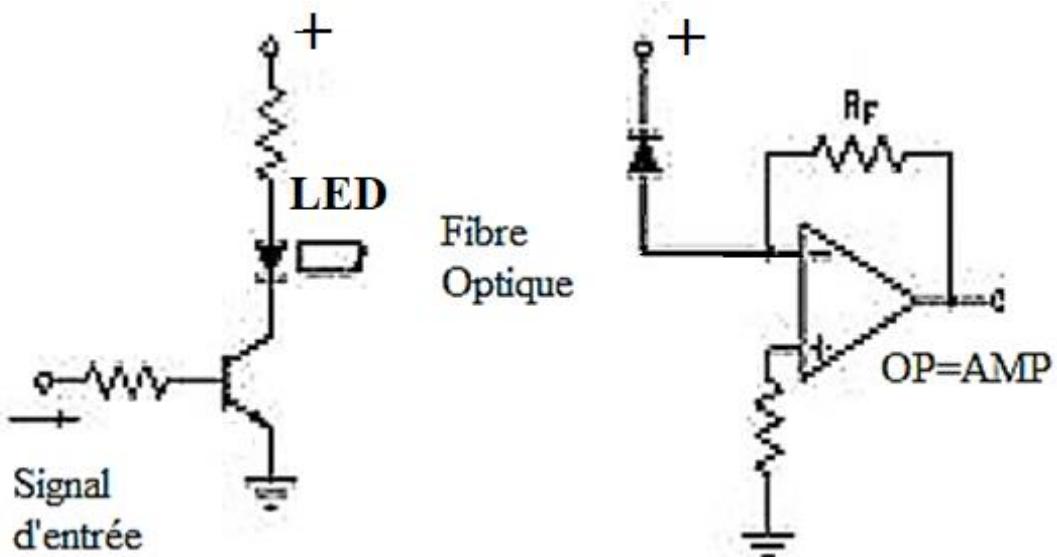


Figure 1.12 : Montage d'une transmission par fibre optique

1.6 Énergie rayonnante et Grandeur radiatives

Définition 1.01

La luminance est une grandeur correspondant à la sensation visuelle de luminosité d'une surface. Elle est également nommée **luminance lumineuse** ou **luminance visuelle**, est

l'intensité lumineuse dI d'une surface élémentaire $d\Sigma$ source dans une direction donnée, divisée par l'aire apparente, $d\Sigma \cos \alpha_\Sigma$, de cette source dans cette même direction [1.10] :

$$L = \frac{dI}{d\Sigma \cdot \cos \alpha_\Sigma} \quad (1.05)$$

Définition 1.02

L'émittance ou *exitance* désigne le flux lumineux émis par unité de surface d'une source lumineuse étendue. On distingue différentes unités selon que l'on travaille en photométrie visuelle ou en photométrie énergétique ou radiométrie. [1.10]

Définition 1.03

Un rayonnement, synonyme de *radiation*, désigne le processus d'émission ou de propagation d'énergie et de quantité de mouvement impliquant une onde, une particule. [1.10]

L'énergie radiative est transmise d'un corps à un autre par des ondes électromagnétiques qui se déplacent à la vitesse de la lumière. La radiation est caractérisée par sa longueur d'onde λ , qui est la distance entre deux crêtes successives de l'onde. La plupart des radiations émises par le Soleil ont des longueurs d'onde entre 0.3 et 4 μm . C'est la radiation solaire ou ondes courtes. La radiation émise par l'atmosphère, radiation terrestre ou ondes longues, se situe dans l'intervalle de fréquences de 4.0 à 200 μm . [1.10]

Pour bien décrire la radiation nous avons besoin de connaître quelques définitions qui décrivent l'énergie rayonnante :

- L'énergie rayonnante Q est la quantité d'énergie transportée par l'onde. Elle est exprimée en joules (J) ;
- La puissance ou flux d'énergie ϕ est la quantité d'énergie émise par une source ponctuelle par unité de temps dans toutes les directions. On l'exprime en watts (W) ;
- L'intensité énergétique I d'une source ponctuelle dans une direction donnée θ est la portion du flux énergétique rayonnée dans cette direction,

$$I = \frac{d\phi}{d\omega} \quad (1.06)$$

Où ω est l'angle solide à travers lequel la puissance est rayonnée. Un angle solide peut se représenter par un cône ayant une ouverture donnée. Il se mesure en stéradians. Il y a 4π radians dans une sphère. L'intensité énergétique est donc exprimée en watts par stéradians (W sr^{-1}).

- La luminance énergétique L est l'intensité émise par unité de surface apparente selon la direction θ pour une source non ponctuelle de superficie dA rayonnant à travers l'angle solide ω . Elle est parfois désignée par le terme anglais radiance. On l'exprime par :

$$L = \frac{d\phi}{d\omega dA \cos \theta} = \frac{I}{dA \cos \theta} \quad (1.07)$$

Les unités employées sont des watts par mètre carré par stéradian ($\text{W m}^{-2}\text{sr}^{-1}$).

La surface apparente $dA \cos \theta$ correspond à la projection, dans le plan perpendiculaire à la direction visée θ , de la surface dA considérée. Si l'énergie émise par un corps dans une direction est proportionnelle à $\cos \theta$, alors la luminance d'un tel corps est indépendante de la direction d'émission : ces corps sont dits lambertiens. Une feuille de papier mat est un exemple de surface lambertienne.

- L'exitance énergétique M est la puissance totale ϕ_e émise dans un hémisphère par unité de surface de la source. On emploie aussi le terme anglais émittance. L'exitance s'exprime par :

$$M = \frac{d\phi_e}{dA} \quad (1.08)$$

Elle se mesure en watts par mètre carré (W m^{-2}). Si la source est lambertienne l'exitance sera égale à la luminance multipliée par π , ce qui correspond à l'intégration de $\cos \theta$ sur un hémisphère.

- L'éclairement énergétique E , parfois aussi appelé irradiance, est la puissance totale hémisphérique ϕ_i incidente par unité de surface. Sa définition ressemble à celle de l'exitance, sauf qu'elle concerne le rayonnement reçu au lieu du rayonnement émis. On l'exprime par les mêmes unités (W m^{-2}) et on le définit par :

$$E = \frac{d\phi_i}{dA} \quad (1.09)$$

Dans le cas d'une surface terrestre, l'éclairement est fourni essentiellement par le rayonnement solaire, après diffusion et atténuation partielle par l'atmosphère. En un lieu donné, il varie essentiellement en fonction de l'angle solaire, donc de l'heure, de la saison et de la latitude du lieu. La topographie locale, plus particulièrement la pente et l'exposition, sont également des facteurs importants de variation de l'éclairement solaire. [1.10]

Comme l'énergie rayonnante est constituée d'un spectre continu de fréquences, toutes les quantités définies ci-dessus s'appliquent aussi à chaque longueur d'onde. On parle alors de quantités spectrales. Nous définissons ainsi la luminance (radiance) et l'éclairement énergétique (radiance), par exemple, par :

$$L = \int_0^{\infty} L_{\lambda} d\lambda \quad \text{Et} \quad E = \int_0^{\infty} E_{\lambda} d\lambda \quad (1.10)$$

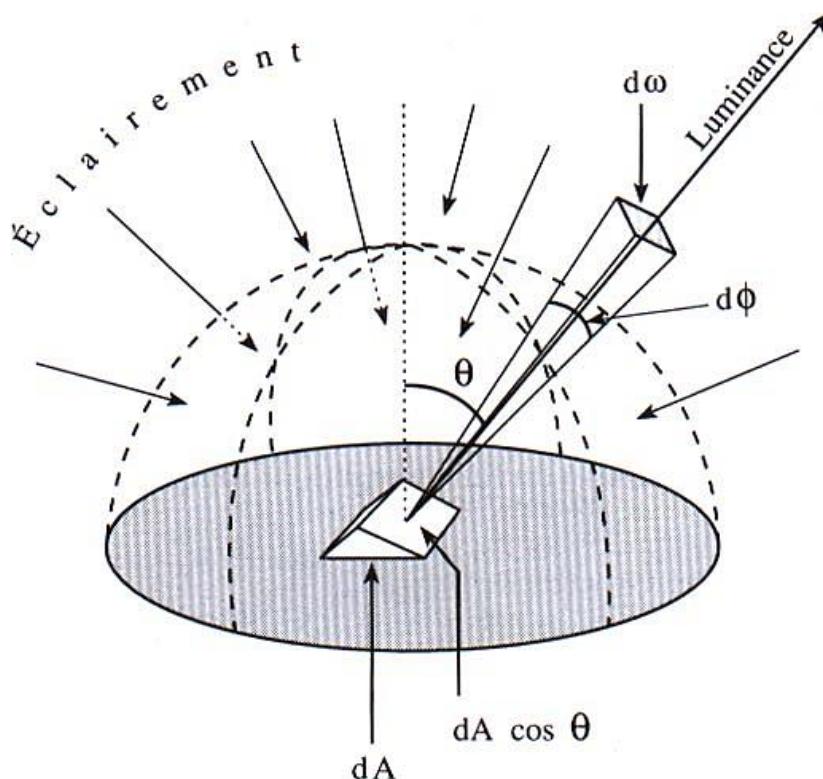


Figure 1.13 : schéma illustrant les notions d'éclairement et de luminance énergétique.

1.7 Lois fondamentales de la radiation

L'interaction entre la matière et la radiation peut se faire par extinction et émission. Si l'intensité de la radiation décroît, il y a extinction de la radiation ; si l'intensité augmente, on a de l'émission. Un photon peut disparaître parce qu'il a été absorbé ou diffusé. Si le photon ne disparaît pas, alors, il a été transmis à travers la matière. [1.10] [1.11]

La somme de l'énergie transmise, diffusée et absorbée doit être égale à la quantité d'énergie incidente (conservation d'énergie). Soit a_λ , r_λ , t_λ respectivement la fraction d'énergie absorbée, réfléchie ou diffusée et transmise. On a alors :

$$a_\lambda + r_\lambda + t_\lambda = 1 \quad (1.11)$$

Quand la matière est un gaz très dilué, l'absorption de la radiation est spectrale et seulement certaines longueurs d'onde sont absorbées. Les lignes spectrales sont caractéristiques des gaz et correspondent à des changements des niveaux d'énergie (énergie électronique, de vibration ou de rotation) qui, comme la mécanique quantique a démontré, sont des niveaux discrets.

Un changement d'énergie correspond à l'émission ou à l'absorption d'un électron. Dans le cas des liquides et des solides, les molécules sont tellement proches que l'absorption ou émission se fait plutôt par bandes. [1.10] [1.11]

Une molécule qui absorbe la radiation d'une certaine longueur d'onde émet aussi dans la même longueur d'onde. Le taux d'émission dépend seulement de la température de la matière et de la longueur d'onde. La loi de Kirchoff dit que :

$$\frac{E_\lambda}{a_\lambda} = f(\lambda, T) \quad (1.12)$$

C'est-à-dire, le rapport entre l'énergie émise et l'absorptivité dépend seulement de la température et de la longueur d'onde. [1.10] [1.11]

Si on définit l'émissivité comme le rapport entre la radiation émise par la substance et le maximum de radiation émise à la même température et longueur d'onde (radiation émise par un corps noir), on obtient :

$$\varepsilon_\lambda = \frac{E_\lambda}{f(\lambda, T)} \quad (1.13)$$

Ces deux équations permettent d'écrire la loi de Kirchoff dans la forme qui nous est familière :

$$\mathcal{E}_\lambda = a_\lambda \quad (1.14)$$

Celle-ci nous dit que l'absorptivité et l'émissivité d'une substance sont égales. Un bon émetteur de radiation de longueur d'onde est aussi un bon absorbeur. Cette équation nous montre aussi que l'émission est possible seulement dans les longueurs d'onde où il y a de l'absorption.

Si l'absorption varie avec la longueur d'onde, l'émission aussi. Cette loi est valide seulement dans des régions où on peut admettre qu'il existe un équilibre thermodynamique local.

Cet équilibre est possible seulement dans le cas où il existe un nombre assez élevé de molécules. Dans l'atmosphère, à des altitudes supérieures à 50 km, la condition d'équilibre radiatif local n'est pas remplie. [1.11]

Un corps qui émet le maximum d'énergie possible à chaque température et à chaque longueur d'onde est un corps noir. Dans le cas d'un corps noir, $a_\lambda = 1$, $r_\lambda = t_\lambda = 0$. Un corps noir est caractérisé par les propriétés suivantes :

- a) L'énergie rayonnante est déterminée uniquement par la température du corps émetteur.
- b) Pour une température donnée, l'énergie émise est le maximum possible pour chaque longueur d'onde.
- c) Le rayonnement émis est isotrope.

La loi de Planck permet de calculer l'existence monochromatique M_λ du corps noir dans chaque bande de fréquence ($\lambda, \lambda + d\lambda$) et d'en déduire la répartition spectrale de la puissance rayonnée.

$$M_\lambda = \frac{c_1 \lambda^{-5}}{e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1} \quad (1.15)$$

Où $C_1 = 3.74 \times 10^{-8} W \cdot m^{-2}$ et $C_2 = 314\ 385 \mu mK$ si λ est exprimé en μ et la température T en Kelvin.

En posant $x = \lambda \cdot T$, on a :

$$M_{x=\lambda T} = c_1 x^{-5} T^5 / (\exp(c_2/x) - 1) = T^5 f(\lambda T) \quad (1.16)$$

Il en résulte que l'ensemble des spectres donnant l'exitance M_λ en fonction de λ , pour diverses valeurs du paramètre T , se réduit à un spectre unique obtenu en traçant la courbe

$$M_{\lambda T}/T^5 = f(\lambda T) \quad (1.17)$$

Cette courbe présente un maximum pour :

$$\lambda T = 2898 \mu \text{ K} = \text{constante} \quad (1.18)$$

Cette constante est appelée la constante de Wien.

L'intégration de la loi de Planck sur toutes les longueurs d'onde nous donne l'éxitance totale du corps noir. [1.10] [1.11]

$$\int_0^{\infty} M_{\lambda} d\lambda = \int_0^{\infty} c_1 \lambda^{-5} / (\exp(c_2 / \lambda T) - 1) d\lambda = \sigma T^4 \quad (1.19)$$

Où $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$ est la constante de Stefan-Boltzmann.

La courbe suivante nous montre la valeur de la longueur d'onde en fonction de l'éxitance.

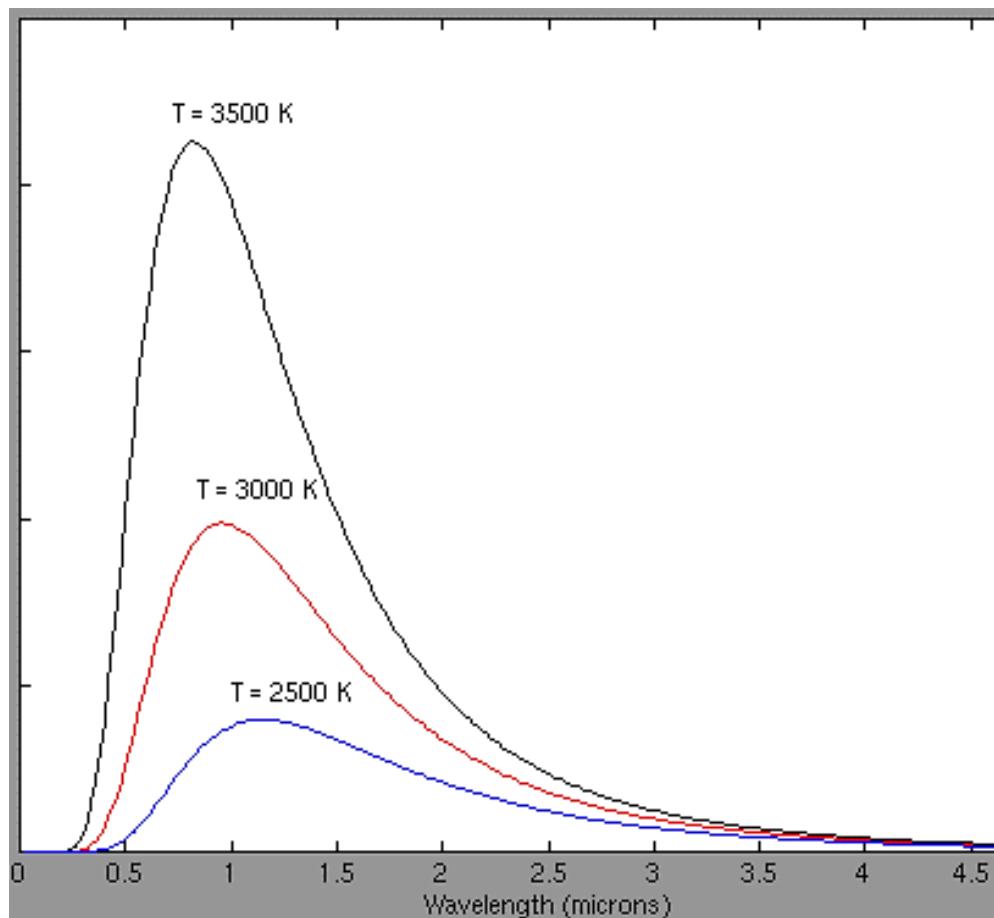


Figure 1.14 : Courbe d'éxitance

1.8 Base de l'optique

La lumière est une onde électromagnétique, de longueur d'onde λ , qui se propage dans un milieu transparent et isolant. (Diélectrique)

Avec :

$$\lambda = \frac{C}{f} \quad (1.20)$$

Où

C : Célérité = $3 \cdot 10^8$ m/s

F : fréquence en Hz

Les équations de Maxwell montrent que la vitesse de propagation dans une substance diélectrique s'écrit :

$$V = \frac{1}{\sqrt{\mu \cdot \varepsilon}} \quad (1.21)$$

Avec $\varepsilon = \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0$ et $\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$

- ε_0 : est la permittivité électrique du vide = $1/(36 \cdot \pi \cdot 10^9 F/m)$.
- ε_r : est la permittivité relative de la substance par rapport au vide. (Sans dimensions)
- μ_0 : désigne la perméabilité absolue du vide = $4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} H/m$.
- μ_r : est la perméabilité relative de la substance par rapport au vide. (Sans dimensions)

Ainsi pour $\varepsilon_r = 1$ et $\mu_r = 1$ (cas du vide ou de l'air) :

$$C = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 + \varepsilon_0}} \quad (1.22)$$

1.8.1 Indice optique d'un milieu isolant et transparent

L'indice optique 'n' (ou indice de réfraction) d'une substance est donné par [1.10] [1.11] :

$$n = \frac{C}{V} \quad (1.23)$$

Ou

$$n = \sqrt{\mu \epsilon} \quad (1.24)$$

1.8.2 Lois de la réfraction

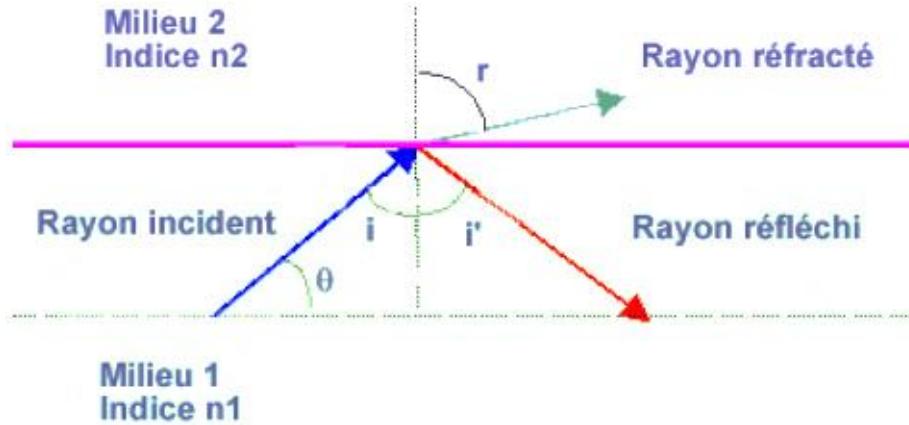


Figure 1.15 : lois de réfraction

À la traversée de la surface séparant deux milieux transparents d'indices de réfraction n_1 et n_2 , un rayon lumineux subit une réflexion et une réfraction.

La relation entre angle d'incidence et angle réfracté est donnée par [1.10] [1.11] :

$$n_1 \cdot \sin(i) = n_2 \sin(r) \quad (1.25)$$

Une partie du rayon lumineux est réfléchie dans le milieu d'indice n_1 , l'autre partie est réfractée dans le milieu n_2 . [1.10] [1.11]

- L'énergie du rayon réfractée est soustraite de celle du rayon incident, ainsi, au bout de quelques passages, le rayon fini par être complètement absorbé.

Pour $n_1 > n_2$ il existe un angle d'incidence limite IL tel que :

$$r = \frac{\pi}{2} \quad (1.26)$$

- Il n'y a plus de rayon réfracté, seul subsiste le rayon réfléchi, le rayon se propage alors dans la fibre sans atténuation.
- Pour une réflexion totale il faut : $IL \leq i \leq \frac{\pi}{2}$ avec $i = \frac{\pi}{2} - \theta$

$$\text{Soit } \theta_{max} = \frac{\pi}{2} - IL$$

$$n_1 \cdot \sin(i) = n_2 \sin(r) \rightarrow \sin(i)$$

Cette équation croit dans le même sens que $\sin(r)$

Avec :

$$\text{Vitesse maxi de l'onde incidente } V_{imax} = \frac{c}{n_1} \rightarrow V_i = f(\theta) = V_{imax} \cdot \cos(\theta)$$

$$\text{Vitesse maxi de l'onde réfractée } V_{rmax} = \frac{c}{n_2} \rightarrow V_r = f(r) = V_{imax} \cdot \cos\left(\frac{\theta}{2-r}\right)$$

Pour $n_2 < n_1$ V_i croit moins vite que $V_r \rightarrow r$ atteint $\frac{\pi}{2}$ avant i

$$\text{Pour } n_1 \cdot \sin(IL) = n_2 \sin\left(\frac{\pi}{2}\right) \rightarrow IL = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \text{ et } \theta L = \frac{\pi}{2} - IL$$

1.9 L'équation de Schrödinger

En physique classique, une particule est décrite par sa position $r(t)$. L'évolution de sa position (la trajectoire de la particule) est donnée par l'équation de Newton. [1.10] [1.12]

$$m \frac{d^2r}{dt^2} = F(r, T) \quad (1.27)$$

Décrise par une fonction d'onde $\Psi(r, t)$ dont nous décrirons la signification et l'équation qui donne son évolution (l'équation de Schrödinger).

1.9.1 Interprétation de la fonction d'onde

Nous associons maintenant à une particule une quantité Ψ que nous appelons fonction d'onde. Ψ est un champ scalaire dépendant du temps :

$$\Psi = \Psi(r, t) \quad (1.28)$$

Cette notion de fonction d'onde est à rapprocher des observations expérimentales qui nous ont montré la dualité onde-corpuscule. Une particule a aussi un aspect ondulatoire. Comme pour les phénomènes ondulatoires, $\Psi(r, t)$ est en général une fonction complexe. [1.10] [1.12]

$$\Psi(r, t) \in \mathbb{C} \quad (1.29)$$

Nous donnons ici l'interprétation de Born. Cette interprétation relie la quantité tel que :

$$\|\Psi(\mathbf{r})\|^2 = \Psi(\mathbf{r}) \Psi^*(\mathbf{r}), (\Psi^* = \text{conjugué complexe de } \Psi) \quad (1.30)$$

À la notion de densité de probabilité de trouver la particule en \mathbf{r} :

$$\|\Psi(\mathbf{r})\|^2 = \text{Densité de probabilité} \quad (1.31)$$

La probabilité de trouver la particule dans un volume $dV = d^3r$ autour de \mathbf{r} est :

$$\|\Psi(\mathbf{r})\|^2 d^3r \quad (1.32)$$

Avec cette interprétation, Ψ est l'amplitude de probabilité. Ψ peut être positive, négative, ou complexe, car seule $\Psi \Psi^* = \|\Psi\|^2$ doit être positive.

Plus généralement, nous associons à la particule une fonction d'onde $\Psi(\mathbf{r}, t)$ complexe.

$\Psi(\mathbf{r}, t)$ est l'amplitude de probabilité (en anglais : probability amplitude).

La quantité $\|\Psi\|^2$ est la densité de probabilité au point \mathbf{r} (en anglais : probability density). [1.10] [1.12]

La probabilité de trouver la particule ou le système dans un volume $d^3r = dV$ autour de \mathbf{r} est égale à :

$$\|\Psi(\mathbf{r})\|^2 d^3r = \Psi(\mathbf{r}) \Psi^*(\mathbf{r}) d^3r \quad (1.33)$$

La dimension de la densité de probabilité $\|\Psi\|^2$ est m^{-3} :

$$[\|\Psi(\mathbf{r})\|^2] = \text{m}^{-3}$$

La connaissance de $\Psi(\mathbf{r}, t)$ permet alors (dans l'interprétation de Born) de connaître l'évolution dynamique de la probabilité de trouver la particule dans un volume d^3r autour de tout point \mathbf{r} en fonction du temps. Nous pourrions ainsi suivre au cours du temps le lieu de \mathbf{r} tel que :

$$\|\Psi(\mathbf{r})\|^2 d^3r \geq \text{une valeur donnée de la probabilité} \quad (1.34)$$

Si la probabilité est grande pour d^3r petit, on pourrait avoir une analogie avec la trajectoire au sens classique

1.9.2 Présentation de l'équation de Schrödinger

La question qui se pose est maintenant la suivante : si on poursuit le parallèle avec le mouvement d'une particule, il faut alors trouver une équation pour décrire la fonction d'onde $\Psi(r, t)$.

Soit un atome d'hydrogène formé d'un proton et d'un électron. La fonction d'onde $\Psi(r)$ permet de calculer la densité de probabilité $\|\Psi\|^2$ de trouver l'électron en un point r .

La fonction d'onde Ψ a été résolue grâce à l'équation de Schrödinger. [1.12]

Ce fut le mérite du physicien autrichien E. Schrödinger d'avoir posé l'équation qui donne l'évolution de $\Psi(r, t)$, connue sous le nom d'équation de Schrödinger dépendante du temps :

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi(r, t) = \left[-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V(r) \right] \Psi(r, t) \quad (1.35)$$

Où :

- $\hbar = \frac{h}{2\pi} = 1.05457 \cdot 10^{-34}$
- ∇^2 : est l'opérateur Laplacien
- m : la masse de la particule
- $V(r)$: l'énergie potentielle de la particule au point r

Lorsque l'on cherche une solution de qui ne dépend pas du temps (solution stationnaire), l'équation de Schrödinger indépendante du temps s'écrit :

$$\left[-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V(r) \right] \Psi(r) = E \Psi(r) \quad (1.36)$$

Où

- E est l'énergie de la particule.

L'équation de Schrödinger décrit l'évolution des ondes-particules, on peut donc répondre à un problème en la résolvant. Seulement voilà, ce n'est pas une tâche aisée, lorsqu'elle est seulement possible. En effet, il n'existe pas tellement de solutions exactes, cette équation est dite analytique. [1.12]

1.10 Conclusion

Un laser ou light amplification by stimulated emission of radiation est utilisé comme un émetteur dans une transmission par fibre optique tandis que le récepteur est à base d'une photodiode. Les travaux rapportés dans ce mémoire, en grande partie, en présente les expériences que nous avons menées tout au long de la recherche. Dans le premier chapitre nous avons décortiqué les généralités concernant la lumière et les composants électroniques associés à son exploitation. Nous allons maintenant aborder les généralités sur les composants du système optique.

CHAPITRE 2 : GENERALITES SUR LES COMPOSANTS DU SYSTEME OPTIQUE

2.1 Introduction

Durant ces dernières décennies, les réseaux câblés à base de fibre optique ont été en forte évolution avec un impact important sur un grand nombre d'applications dans plusieurs domaines.

Dans le présent chapitre, nous allons étudier minutieusement les points principaux du système optique. Nous mettrons en évidence les caractéristiques et propriétés de la fibre optique, objet de notre étude. Nous y verrons les caractéristiques physiques des différents types de fibres optiques utilisés pour diverses applications, en passant par certains composants du système optique qui seront catégorisés en deux : les composants actifs et les composants passifs.

2.2 Définition et historique de la fibre optique

La fibre optique est un composant constitué d'un fil en verre ou en plastique très fin qui possède la propriété de conduire la lumière. Elle sert dans les transmissions de données terrestres et océaniques et offre un débit d'information nettement supérieur à celui des câbles coaxiaux ou autres types de supports. [2.01]

Avant d'en savoir davantage, un historique est nécessaire pour connaître les origines de cette technologie.

Ce sont les grecs anciens qui utilisèrent pour la première fois des cylindres de verre pour conduire des ondes lumineuses. On l'utilisait seulement à cette époque à des usages décoratifs mis à profit par les « artisans du verre » pour créer des pièces décoratives et admirer la beauté de la lumière. [2.01]

Plusieurs siècles plus tard, les artisans de la Renaissance italienne affinèrent la technique des grecs pour la fabrication de « millefiori ». Les techniques utilisées étaient similaires à ceux employées pour la fibre optique d'aujourd'hui.

En 1854, le physicien Irlandais John Tyndall fit la démonstration scientifique du principe de réflexion totale interne, le mécanisme de base même de la fibre optique. Cette démonstration se fait en injectant un rayon lumineux dans un jet d'eau, et en montrant qu'en changeant la direction du jet d'eau le rayon lumineux changeait de direction également. Cette idée d'infexion fut une révolution à une époque où il était communément admis que la lumière voyageait en ligne droite.

Dans les années 1880, le physicien américain Alexander Graham Bell, inventeur du téléphone, a fait une autre invention : le "photophone". [2.01]

Cet appareil, qui utilisait la lumière pour transporter la voix humaine sur plusieurs centaines de mètres, était la première forme de communication "optique". Mais il fallut attendre le XX^e siècle pour que la fibre optique apparaisse.

Puis en 1927, les savants Baird et Hansell firent breveter un dispositif permettant de transporter des images de télévision sur fibres optiques. L'invention ne fut pourtant pas utilisée à grande échelle en raison de la piètre qualité des fibres utilisées à l'époque.

C'est au début des années 1950, avec le « fibroscope flexible » de Van Heel et Hopkins que la fibre optique trouva son premier débouché commercial. En médecine, on l'utilisait pour transmettre des images via des fibres en verre, ce qui s'avéra idéal pour des applications médicales comme l'endoscopie, pour observer l'intérieur du corps humain. Il y avait également des applications industrielles pour inspecter des soudures dans les réacteurs d'avion.

Au début des années 1960, le potentiel de la fibre optique fut décuplé par la découverte et le développement du principe du laser par Alfred Kastler, un physicien français. La réalisation du laser par les physiciens américains suivit quelques années plus tard.

Le laser permit en effet d'émettre un signal lumineux beaucoup plus puissant et donc de transmettre des informations sur des distances beaucoup plus grandes sous forme de lumière grâce à la fibre optique. Cette expérience est souvent considérée comme la première transmission de données par fibre optique. [2.02]

En 1966, Kao, Hockham et Werts ont lancé des études sur la communication optique par guides d'ondes diélectriques ou fibres optiques en verre pour éviter la dégradation du signal optique par l'atmosphère. Cependant, les pertes dans cette fibre optique étaient telles que le signal disparaissait au bout de quelques centimètres, non par perte de lumière, mais parce que les différents chemins de réflexion du signal contre les parois finissaient par en faire perdre la phase. Une telle conclusion rendait la fibre encore peu avantageuse par rapport à la ligne cuivre traditionnelle.

Les pertes de phase entraînées par l'usage d'une fibre de verre homogène constituaient le principal obstacle à l'utilisation courante de la fibre optique. Initialement les fibres optiques étaient exposées à des atténuations très élevées (1000 dB/km) et n'étaient donc pas compétitives par rapport aux câbles coaxiaux en basse fréquence (5 à 10 dB/km), les favoris de l'époque.

En 1970, les scientifiques américains Robert Maurer, Donald Keck et Peter Schultz de la société Corning en Amérique, produisirent la première fibre optique, avec des pertes de phase

suffisamment faibles de l'ordre de 17 dB/km, pour être utilisée dans les réseaux de télécommunications. Cette fibre, pourtant loin d'égaler les performances des fibres optiques modernes, pouvait transporter 65 000 fois plus d'informations qu'un câble en cuivre ordinaire.

En 1974, les pertes de fibre optique de longueur d'onde 1 300 nm ont été réduites à 0.4 dB/km. Aujourd'hui la fibre conventionnelle affiche des pertes nettement plus faibles de l'ordre de 0,25 dB/km pour la longueur d'onde 1 550 nm utilisée dans les télécommunications. En 1977, l'essai sur le terrain de la première utilisation commerciale de la fibre multimode entre deux bureaux de téléphone, d'une distance de 7 000 m, a été faite à Chicago avec succès.

Depuis, partout dans le monde, plus de 80 % des communications à longue distance passent aujourd'hui par la fibre optique, soit un réseau de plusieurs dizaines de millions de kilomètres. La baisse significative des coûts survenue ces dix dernières années permet d'ailleurs de proposer la fibre optique comme alternative au cuivre dans tous les types de réseaux. Elle demeure encore un support de transmission loin d'être oublié dans le secteur des télécommunications.

2.3 Composants passifs

2.3.1 Constitution des fibres optiques

Nous allons étudier dans ce paragraphe la constitution des fibres optiques.

En effet, elle est constituée par du verre, et considérée comme une baguette très fine de matériau de « verre de silice ou parfois synthétique » étirée dont l'aspect filiforme lui confère la souplesse. [2.02]

Elle est assimilée à un guide d'onde optique circulaire. Il s'agit en fait d'un cylindre de verre qui possède des caractéristiques qui guident la lumière en son cœur.

En général, elle est constituée d'un milieu diélectrique appelé « *cœur* », partie où a lieu la réfraction qui permet le transfert de la lumière et des informations.

Celui-ci est recouvert d'un second milieu, nommé « *gaine* », d'indice de réfraction inférieur à celui du cœur. Aussi, celle-ci emprisonne la lumière dans le cœur en la réfléchissant pratiquement sans perte. [2.02]

La gaine est enrobée de couches de matériaux plastiques appelées « *revêtements* », pouvant réunir plusieurs fibres. Ces revêtements sont destinés à protéger la fibre et à lui fournir une bonne résistance mécanique et une flexibilité.

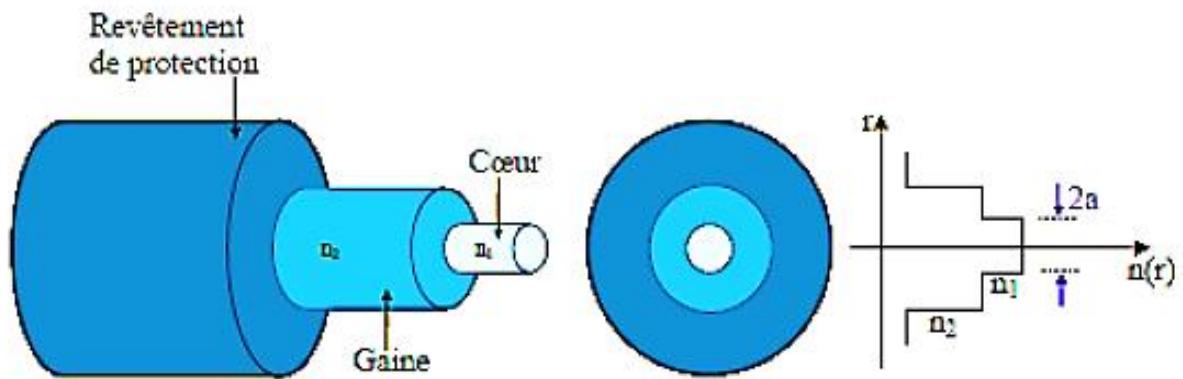


Figure 2.01 : Structure d'une fibre optique

2.3.2 Caractéristiques générales de la fibre optique

2.3.2.1 Réflexion totale interne

La fibre optique utilisant la lumière comme élément fondamental de la transmission, celle-ci est exploitée jusqu'à sa forme la plus optimale.

Comme nous avons mentionné précédemment, le principe de la réflexion totale interne est à la base de la propagation des ondes lumineuses dans la fibre optique.

D'après ce principe, lorsqu'un rayon lumineux passe d'un milieu à un autre dont l'indice de réfraction est plus faible, il peut être réfléchi.

De plus, lorsque l'angle d'incidence du rayon lumineux est plus grand que l'angle critique, la lumière est totalement réfléchie et il n'y a aucune perte. La réflexion totale interne est régie par ces deux paramètres : les indices de réfraction des deux milieux *ni et l'angle critique* θ_c . [2.02]

Ces facteurs sont reliés par l'équation suivante :

$$\sin\theta_c = \frac{n_2}{n_1} \quad (2.01)$$

Ainsi, sachant les indices de réfraction des deux matériaux, l'angle critique θ_c peut être calculé.

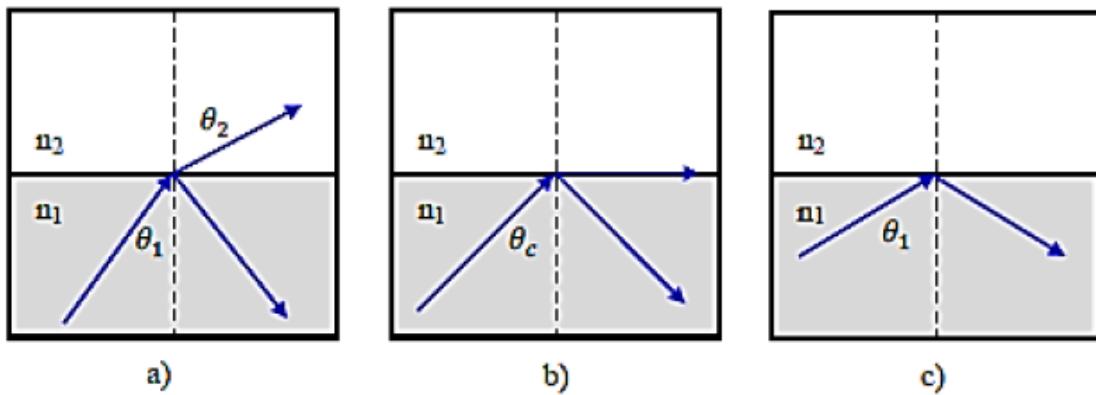


Figure 2.02 : a) Réfraction pour $\theta_1 < \theta_c$ le rayon incident est partiellement réfléchi dans le premier milieu ; b) rayon critique lorsque $\theta_1 = \theta_c$; c) réflexion totale interne pour $\theta_1 > \theta_c$

L'indice de réfraction d'une substance peut être déterminé par le rapport entre la vitesse de la lumière dans le vide c (ou célérité de la lumière) et sa vitesse dans le matériau v , c'est-à-dire :

$$n = \frac{c}{v} \quad (2.02)$$

La lumière voyage donc plus rapidement dans un matériau dont l'indice de réfraction est plus petit.

Nous obtenons alors la figure 2.02 c) qui est une illustration de la réflexion totale interne, cas où $\theta_1 > \theta_c$

Avec :

θ_1 : L'angle d'incidence du rayon lumineux.

2.3.2.2 Propagation de la lumière dans une fibre optique

Les propriétés de conduction de la lumière dans la fibre optique reposent sur le principe physique de la réflexion totale interne décrit dans le précédent paragraphe.

Dans la fibre optique, le cœur et la gaine ont des indices de réfraction différents. Pour qu'il y ait propagation de la lumière, l'indice de réfraction du cœur doit être plus grand que celui de la gaine, de sorte qu'on retrouve un effet miroir à l'intérieur de celle-ci. La lumière reste donc confinée à l'intérieur du cœur. [2.02]

Afin d'avoir propagation de la lumière sans perte dans la fibre optique, tous les rayons lumineux heurtant l'interface entre le cœur et la gaine devront respecter la condition de réflexion totale

interne dite précédemment. L'angle d'entrée de la lumière, calculé en fonction des indices, sera donc scrupuleusement respecté. [2.02]

Lorsqu'un rayon lumineux pénètre dans une fibre optique à l'une de ses extrémités avec un angle incident adéquat, il subit de multiples réflexions totales internes. Ce rayon se propage alors jusqu'à l'autre extrémité de la fibre sans perte, en empruntant un parcours en zigzag tel qu'illustré dans la Figure 2.03. [2.02]

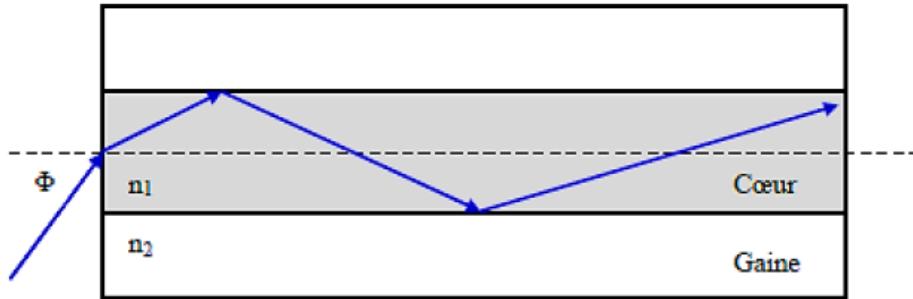


Figure 2.03 : Propagation de la lumière dans une fibre

La propagation de la lumière dans la fibre peut se faire avec de très faibles de pertes même lorsque celle-ci est courbée significativement.

Une fibre optique est souvent décrite selon deux paramètres :

- Le premier paramètre est la différence d'indice normalisée, qui donne une mesure du saut d'indice entre le cœur et la gaine :

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} \approx \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad (2.03)$$

- Le second est l'ouverture numérique ON de la fibre. Concrètement, ce paramètre est le sinus de l'angle d'entrée maximal de la lumière dans la fibre pour que la lumière puisse être guidée sans perte. Cet angle est mesuré par rapport à l'axe de la fibre. C'est l'angle Φ comme nous observons sur la figure précédente.

Cette ouverture est donnée par la relation :

$$\sin \Phi_{max} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (2.04)$$

2.3.3 Types de fibres optiques

Il existe trois types de fibre optique : monomode, multimode et microstructurée. Nous allons étudier les caractéristiques de chaque type. [2.03]

2.3.3.1 Fibres monomodes

Par définition, c'est une fibre qui ne supporte qu'un seul mode de propagation de la lumière utilisé surtout en télécommunications très grandes distances et très hauts débits. [2.03]

Elle a un diamètre plutôt plus petit par rapport aux autres types : 9 à 10 μm .

A cause du très petit diamètre du cœur, le transport de la lumière s'effectue sans réflexion et de manière quasi-rectiligne. Son avantage est qu'il y a peu de dispersion, ce qui fait qu'une impulsion lumineuse polychromatique transmise dans la fibre n'est alors que très peu déformée. Ils ont une bande passante de 10 GHz et plus avec une atténuation allant de 0.2 à 0.4 dB/Km et une ouverture numérique ON de 0.1 à 0.12. [2.03]

La figure suivante l'illustration d'une fibre monomodale.

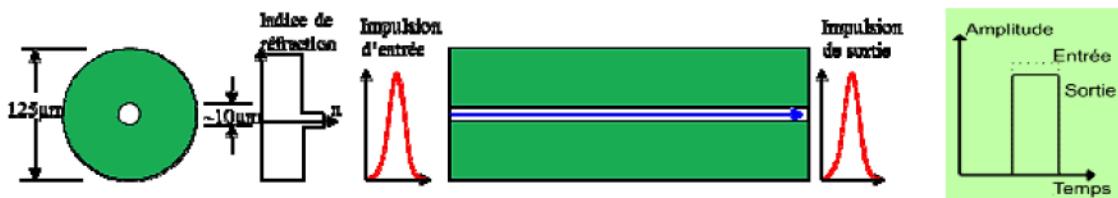


Figure 2.04 : Structure d'une fibre monomode

Il ressort de la figure ci-dessus que, les résultats sont meilleurs car il y a peu de déformation vue l'impulsion de sortie de la fibre, c'est-à-dire une faible atténuation. Cependant, elle présente un inconvénient en termes de coût car ils nécessitent une puissance d'émission très élevée à cause du faible diamètre du cœur. [2.03]

D'ailleurs, avec une section aussi petite, nous pouvons noter que seule la lumière provenant d'un laser est exploitable.

Un nouveau type de fibres à cristaux photoniques a été mis au point ces dernières années. Elles permettent entre autres d'avoir de gains significatifs de performance dans le domaine du traitement optique de l'information par des techniques non linéaires, dont l'amplification optique ou bien d'autres applications utilisables dans le domaine de la médecine.

2.3.3.2 Fibres multimodes ou de classe A ou multimodales

Les fibres multimodes sont les premiers types de fibres optiques qui ont été fabriquées. Le cœur possède une taille importante par rapport au reste de la fibre. [2.03] [2.04]

Ce type de fibre présente certains inconvénients tels que l'atténuation des signaux plus marquée ou encore une vitesse de propagation des signaux plus faible. Elles sont aujourd'hui utilisées sur de courtes distances ou dans les décos.

Il existe deux types de fibres multimodes : la fibre à saut d'indice et la fibre à gradient d'indice. Leur différence réside principalement dans la différence du diamètre du cœur. La fibre à saut d'indice présente un diamètre de cœur deux à quatre fois plus grand que celui des fibres à gradient d'indice.

a) Fibres à saut d'indice

C'est la première invention de fibre. En effet, Ce type de fibre est le plus simple à fabriquer car elle est directement issue des applications optiques traditionnelles. [2.03] [2.04]

Le diamètre de son cœur est responsable d'une très grande atténuation des données. Il présente un diamètre de $200 \mu\text{m}$, relativement gros par rapport à la longueur d'onde de la lumière (de l'ordre du μm dans l'infrarouge).

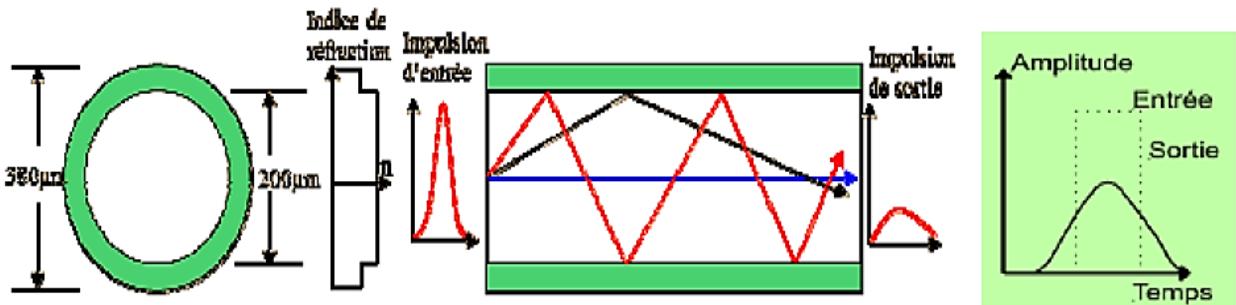


Figure 2.05 : Structure d'une fibre multimode à saut d'indice

La gaine optique, de $380 \mu\text{m}$, joue un rôle actif dans la propagation, et ne doit pas être confondue avec les revêtements de protection déposés sur la fibre.

Le rayon laser est dans ce cas guidé par réflexion totale au niveau de l'interface cœur-gaine, sinon il est réfracté dans la gaine. Ceci reste vrai si la fibre cesse d'être rectiligne, à condition que le rayon de courbure soit grand devant son diamètre. L'impulsion de sortie est très dégradée par rapport à celle de l'entrée. [2.03] [2.04]

b) Fibres multimodales à gradient d'indice

C'est la fibre la plus courante. Elle connaît plusieurs améliorations par rapport à la fibre à saut d'indice en raison du diamètre de son cœur qui est nettement plus petit ($50 \mu\text{m}$ et $62.5 \mu\text{m}$) et

que ce dernier est séparé en plusieurs couches ayant un indice de réfraction de plus en plus grand lorsqu'on se rapproche du centre.

Ces deux améliorations ont pour but de réduire l'atténuation de l'information par rapport à la fibre à saut d'indice, ce qui fonctionne parfaitement car le signal de sortie représente plus de la moitié du signal d'entrée comme illustré sur la figure. [2.03] [2.04]

Dans une fibre optique à gradient d'indice, l'indice de réfraction du cœur n'est pas constant. Il est en général maximal au centre de la fibre et diminue progressivement jusqu'à l'interface de la gaine. Ce profil d'indice de réfraction peut être obtenu en variant la concentration ou en effectuant un dopage lors de la fabrication de la préforme. [2.03] [2.04]

Dans une fibre de ce type, la lumière n'est plus réfléchie à l'interface cœur-gaine, mais est plutôt courbée progressivement lorsqu'elle s'en approche. La figure ci-dessous met en exergue ce phénomène.

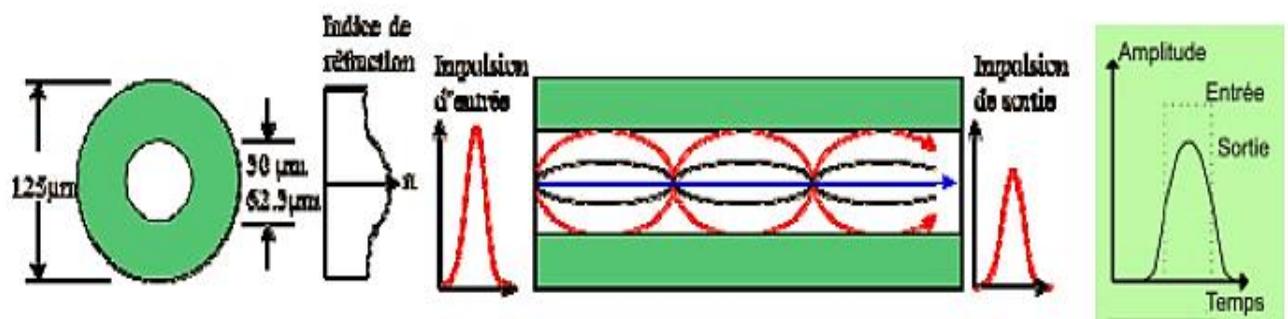


Figure 2.06 : Structure d'une fibre multimodale à gradient d'indice

Ces fibres sont spécialement conçues pour les télécommunications. Le guidage est cette fois dû à l'effet du gradient d'indice. Les rayons guidés suivent une trajectoire d'allure sinusoïdale.

La gaine, de 125 μm n'intervient pas directement, mais élimine les rayons trop inclinés.

L'avantage essentiel de ce type de fibre est de minimiser la dispersion du temps de propagation entre les rayons. Il apparaît que les résultats sont nettement améliorés par rapport à ceux procurés par la fibre à saut d'indice. [2.03] [2.04]

2.3.3.3 Fibres micro-structurées

Il existe plusieurs appellations pour désigner cette famille de fibres : Fibres micro-structurées, fibres à trous, fibres à cristaux photoniques ou fibres à bandes interdites photoniques.

L'idée de fibres à cristaux photoniques, PCF ou Photonic Crystal Fiber, remonte à 1991, mais la fabrication de la première PCF ne date que de 1995. Les problèmes liés à la fabrication de

telles fibres furent résolus à l'Université de Bath par les fondateurs de l'entreprise Blaze Photonics. [2.03] [2.04]

Les fibres PCF sont très proches des fibres classiques. Cependant, l'étude au microscope de la section d'une PCF permet d'observer une structure particulière.

En effet, les fibres PCF sont construites à partir d'une structure hexagonale de petits cylindres d'air autour d'un cœur qui peut être en silice ou constitué d'air, suivant l'utilisation visée.

L'originalité de ces guides d'ondes provient de leurs mécanismes de confinement de la lumière qui reposent sur la périodicité de leur structure d'indice.

Cette dernière permet, dans certains cas, d'utiliser l'air pour propager la lumière dans un cœur de verre ou d'air.

La figure ci-dessous représente un exemple de fibre micro-structurée.

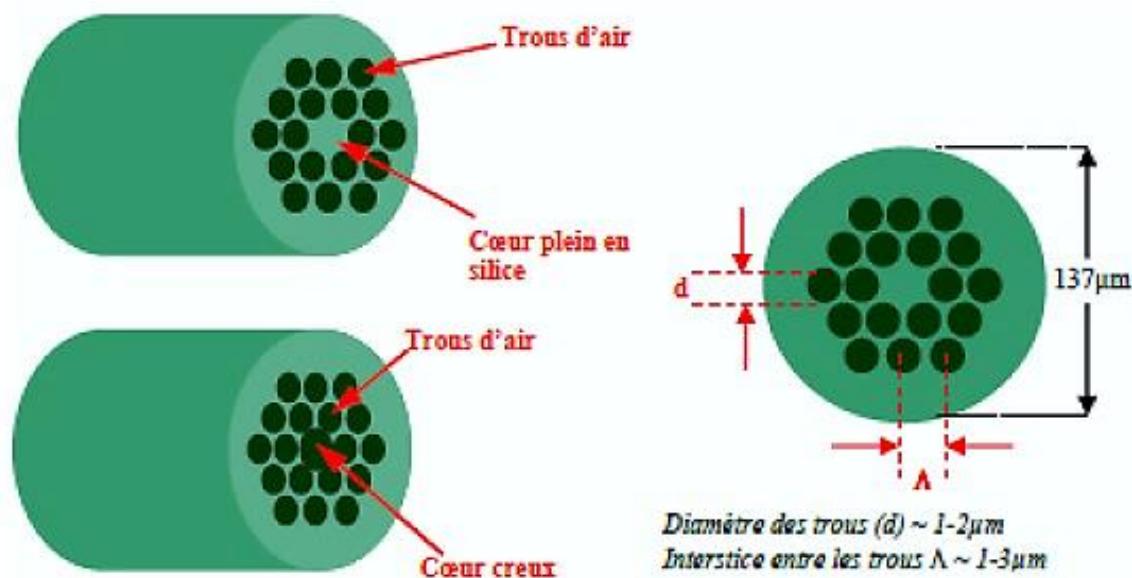


Figure 2.07 : Structure des fibres micro-structurées

Les fibres micro-structurées se divisent généralement en deux principales catégories : les fibres à guidage d'indice qui possèdent un cœur solide et les fibres photoniques à bande interdite qui ont des éléments micro-structurés périodiques et un cœur constitué d'un matériau à indice bas (par exemple un cœur creux). Nous observons les détails de cette classification sur la figure ci-après.

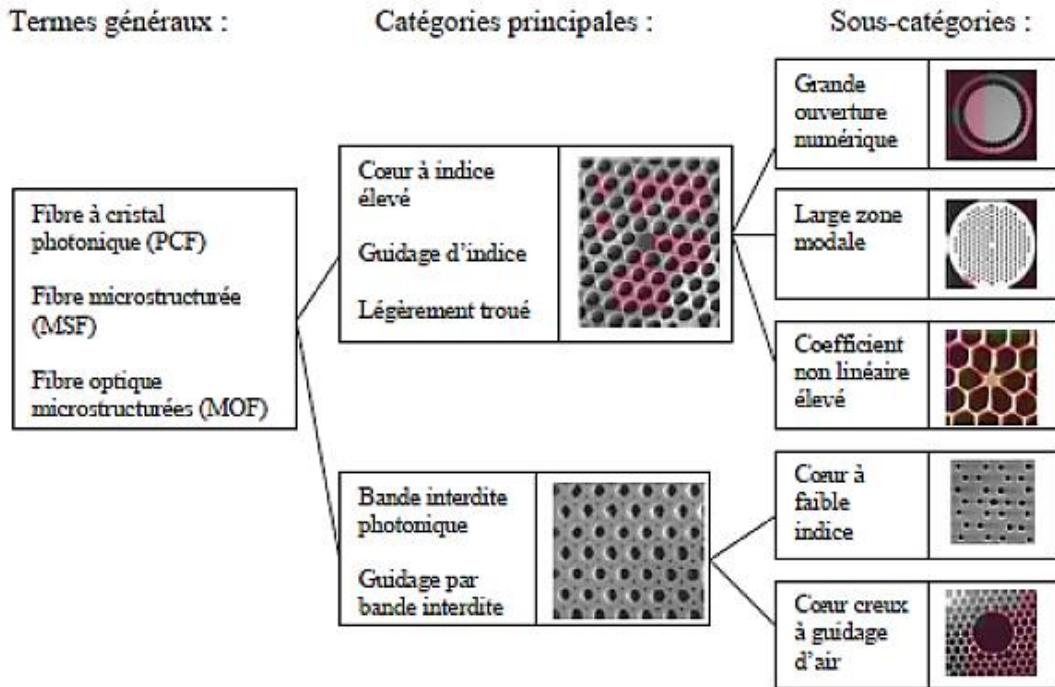


Figure 2.08 : Classification des fibres à cristaux photoniques

Comme les fibres conventionnelles, les fibres à cristaux photoniques présentent plusieurs avantages parmi lesquels : D'abord, la très faible sensibilité à la courbure y compris après enroulement sur des bobines de diamètre inférieur au centimètre. Ensuite, il y a aussi l'accès aisément pour le remplissage du cœur ou du gainage (gaz ou liquides) ; et enfin la réflexion de Fresnel réduite à partir de la surface de la fibre. [2.03] [2.04]

Comme avantage, il y a également la dynamique de valeurs de dispersion disponibles (fortement négative à fortement positive), le seuil de puissance élevé pour les non-linéarités de fibre et la puissance crête élevée du mode de guidage avant dépassement du seuil de rupture des matériaux. [2.03] [2.04]

Les fibres à cristaux photoniques ont également des inconvénients comme les difficultés de fabrication des cristaux photoniques 3D ; expliquant le développement relativement limité de ces structures.

En outre il existe encore beaucoup d'autres qui sont des fibres spéciales : comme les fibres plastiques, les fibres à domaines spectrales particuliers, les fibres dites « tout risque », les transmissions à grande distance et /ou haut débit

Ainsi nous pouvons effectuer la comparaison suivante des performances des 3 types de fibres que l'on a vu : monomode, et les deux types de fibres multimodales. Quelle que soit la fréquence

(en abscisses), l'atténuation (en ordonnées) est constante et seule la dispersion lumineuse limite la largeur de la bande passante.

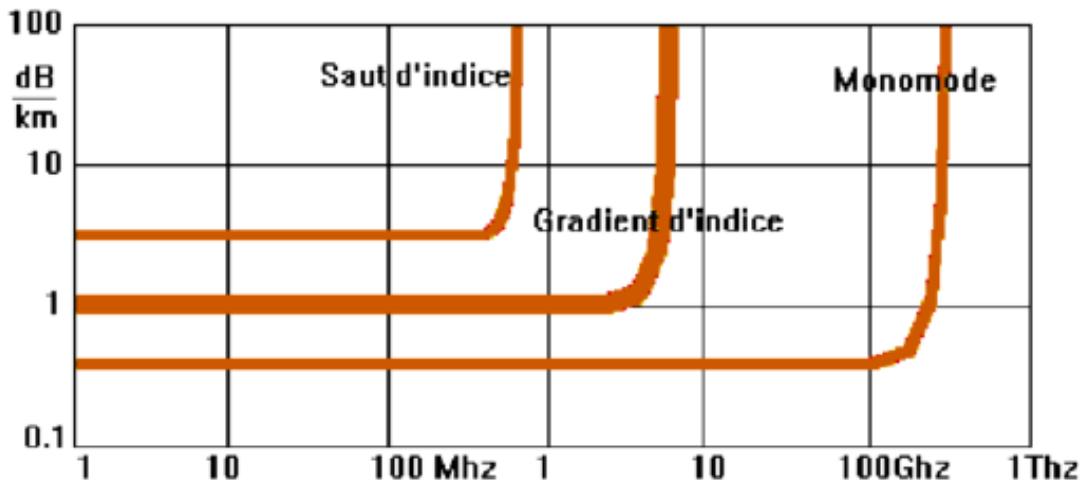


Figure 2.09 : Comparaison des différents types de fibres

Nous avons établi les caractéristiques générales des fibres optiques. Entrons maintenant dans le paragraphe sur les dimensions. [2.03] [2.04]

2.3.4 Dimension de la fibre optique

Nous allons revenir sur la notion d'ouverture numérique (ON) pour apporter quelques précisions. [2.03] [2.04] [2.05]

En effet, l'ON permet de chiffrer l'aptitude d'une fibre optique à collecter la lumière. En d'autres termes, l'angle γ_{max} est le demi - angle au sommet d'un cône, la cône d'acceptance qui contient tous les rayons lumineux qui pourront pénétrer dans la fibre et se propager par réflexions internes totales comme il apparaît sur la figure 2.10. Selon la loi de Descartes, l'angle d'incidence γ , pris par rapport à la normale à la surface d'entrée de la fibre, est relié à l'angle de réflexion interne Θ par la relation suivante :

$$n_0 \sin y = n_1 \sin \left(\frac{\pi}{2} - \theta \right) = n_1 \cos \theta \quad (2.05)$$

Si l'ON est faible, il y aura amélioration de la bande passante mais l'injection de la lumière sera plus délicate. D'où la définition de l'Ouverture Numérique donnée par la formule (2.04) par l'angle Φ et que nous le retrouvons à nouveau dans (2.06).

$$ON = n_0 \sin y_{max} = \sqrt{-n_1^2 - n_2^2} \quad (2.06)$$

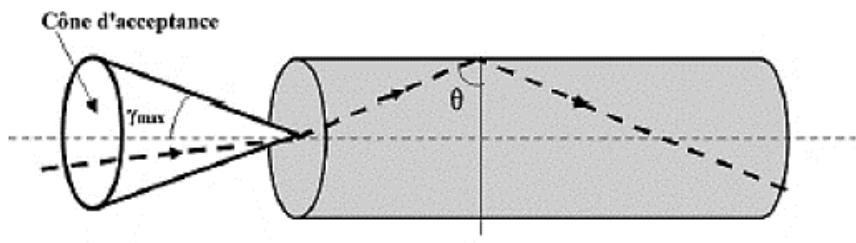


Figure 2.10 : Illustration de l'ouverture numérique

Nous avons vu aussi la différence d'indice normalisée Δ que nous avons rencontré précédemment dans la formule (2.03). Il y a également la fréquence normalisée. [2.03] [2.04] [2.05]

2.3.5 Affaiblissement lors de la propagation

Définition 2.01

L'atténuation ou affaiblissement est la diminution relative de la puissance d'un signal au cours de sa transmission. C'est le rapport entre la valeur efficace du signal à la sortie par celle à l'entrée de la section considérée. [2.05]

$$A = \frac{\text{Valeur efficace en sortie}}{\text{Valeur efficace en entrée}} \quad (2.07)$$

Définition 2.02

La diffusion Rayleigh est un mode de diffusion des ondes, dont la longueur d'onde est très supérieure à la taille des particules diffusantes. Nous notons que c'est une diffusion élastique, car cela se fait sans variation d'énergie, autrement dit l'onde conserve la même longueur d'onde. [2.05]

Malgré les performances avérées des fibres optiques, les signaux qui les traversent subissent des atténuations lors de la propagation. Les différents types de pertes sont liés à la diffusion de Rayleigh, l'absorption, la dispersion modale, l'imperfection des connexions, la présence des courbures et micro-courbures à l'intérieur de la fibre. [2.05]

L'atténuation du signal dépend essentiellement de la nature de la fibre (monomode ou multimode), c'est-à-dire pertes à défaut du matériau qui sont en effet des pertes par absorption

dues à des phénomènes de résonance moléculaire, des impuretés piégées au sein même de la fibre lors de sa fabrication. [2.05]

Nous pouvons constater que la perte par diffusion à savoir :la diffusion Rayleigh énoncée précédemment en relation avec la structure atomique de la fibre (silice, les dopants) ; la diffusion de Mie due à des imperfections du verre (bulles, variation d'indice de réfraction).

Il y a aussi les pertes dues aux imperfections du guide, des raccordements, la connectique, la pose des câbles.

Les figures 2.11 et 2.12 ci-après donnent respectivement un exemple de l'évolution des atténuations de la fibre optique et de la diffusion de Rayleigh en fonction de la longueur d'onde.

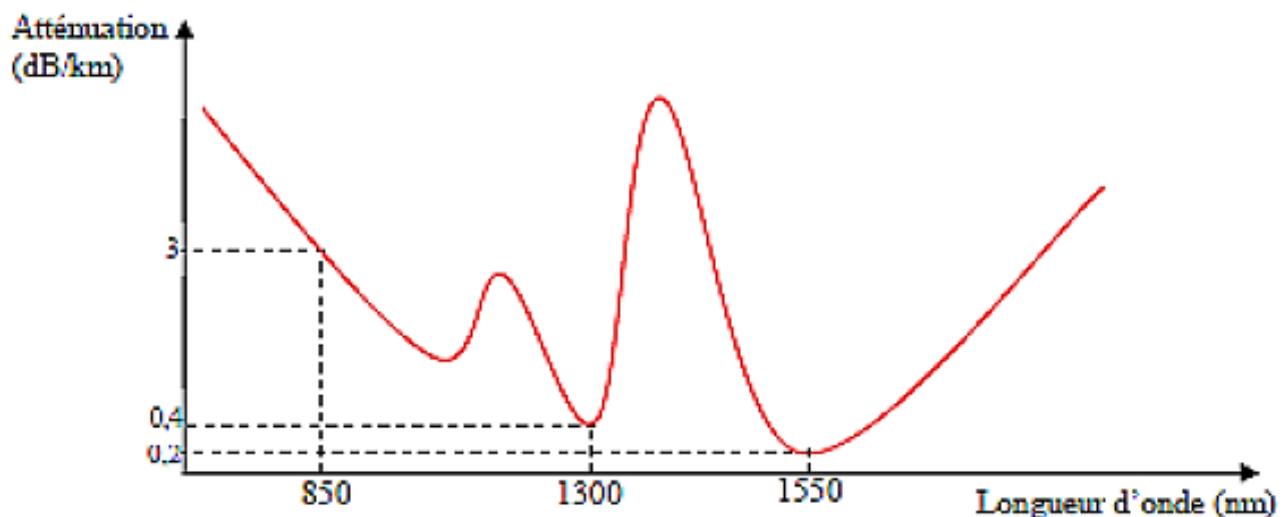


Figure 2.11 : Atténuation de la fibre optique en fonction de la longueur d'onde

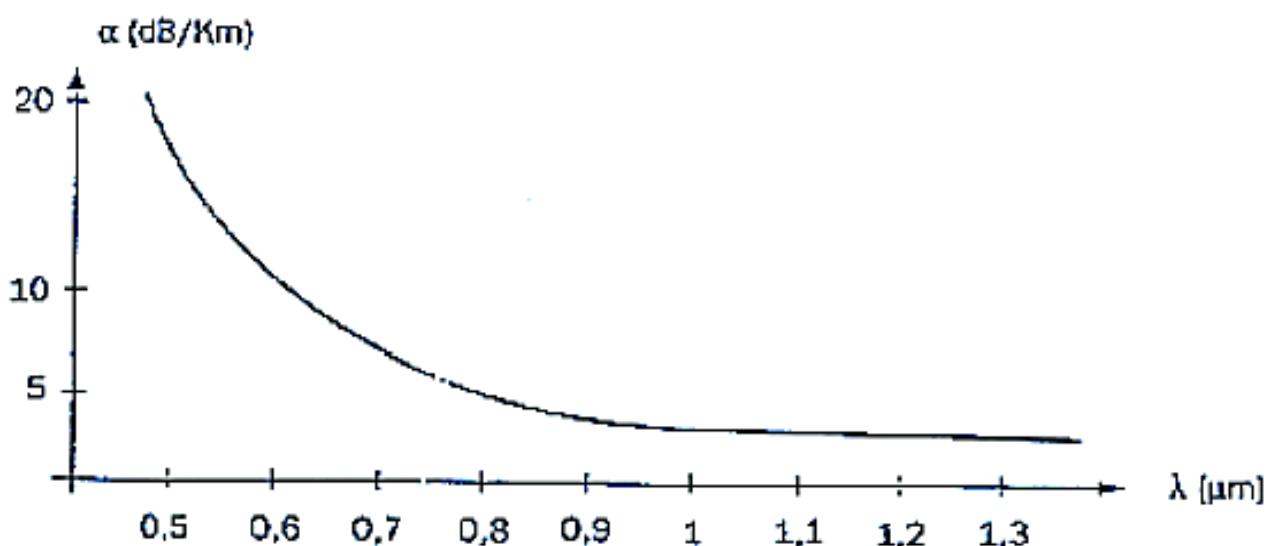


Figure 2.12 : Perte par diffusion de Rayleigh d'une fibre

Il apparaît du tableau 2.01 ci-dessous, une comparaison des atténuations pour différents types de fibres optiques : monomode (SMF) et multimode (MMF), en fonction de la longueur d'onde et de la fréquence correspondante. [2.05]

FIBRE OPTIQUE			
Type de fibre	Atténuation [dB/km]	Longueur d'onde [nm]	Fréquence [THz]
MMF	≈ 3	850	352.9
MMF+SMF	≈ 0.4	1300	230.7
SMF	≈ 0.2	1550	193.5

Tableau 2.01 : Comparatif de l'atténuation kilométrique des fibres optiques SMF (Single Mode Fiber) et MMF (Multi Mode Fiber).

D'après ce tableau comparatif, nous pouvons remarquer que les fibres monomodes exploitées à la longueur d'onde de 1550 nm présentent des atténuations très faibles de l'ordre de 0,2 dB/km. Par contre les fibres multimodes exploitées à une longueur d'onde de 850 nm présentent des atténuations plus importantes de l'ordre de 3 dB/km. Ces valeurs restent tout de même faibles comparées à celles obtenues avec les câbles coaxiaux. [2.05]

2.3.6 Bande passante des fibres

La bande passante ou réponse en bande de base d'une fibre optique détermine la capacité de cette fibre à transmettre des informations et se limite à une coupure de -3dB optique du signal transmis. [2.05] [2.06]

Soit une variation de la forme : $B \cdot L - a$

On a :

- B : Bande passante
- L : la longueur de la fibre
- a : une variante selon la caractéristique de la fibre (entre 0,5 et 1)

La bande passante est exprimée en [MHz.km]. Pour une fibre monomode, la bande passante est définie par la relation suivante qui est inversement proportionnelle à $D(\lambda)$ dispersion chromatique, à l'écart spectral (en nm) du laser et la longueur L de la fibre.

Soit :

$$B = \frac{0.35}{2 \cdot D(\lambda) \Delta \lambda} \quad (2.08)$$

Nous pouvons noter alors que plus la fibre est courte, plus sa bande passante est élevée ; et plus l'ouverture numérique est faible, plus la largeur de la bande passante est importante. Ainsi deux facteurs principaux affectent cette bande passante : la dispersion modale et la dispersion chromatique.

Il y a dispersion modale quand les différents modes ne se propagent pas à la même vitesse, et le signal de sortie est déformé dû au chevauchement à l'intérieur de la fibre.

Cela se résout en optimisant la valeur de l'exposant paramétrique du gradient d'indice, on égalise presque parfaitement les vitesses de propagation des modes.

La notion de dispersion chromatique (dispersion due aux matériaux), est évoquée quand les sources utilisées ont un spectre d'émission plus ou moins large et du fait que l'indice de réfraction du verre varie en fonction de la longueur d'onde, aussi il y a une dispersion incohérente dans la lumière.

2.3.7 Câbles à fibre optiques

Les câbles à fibre optique se diversifient selon leur mode de conception par la façon dont ils sont assemblés. [2.05] [2.06]

Ainsi on distingue : les câbles à structure serrée qui se distinguent par l'application d'un revêtement plastique directe sur la gaine optique ; et les câbles à structure libre, dans laquelle les fibres sont disposées librement dans un tube à l'intérieur du câble et ne subissent aucune contrainte.

La figure 2.13 illustre les deux structures qu'on vient de citer.

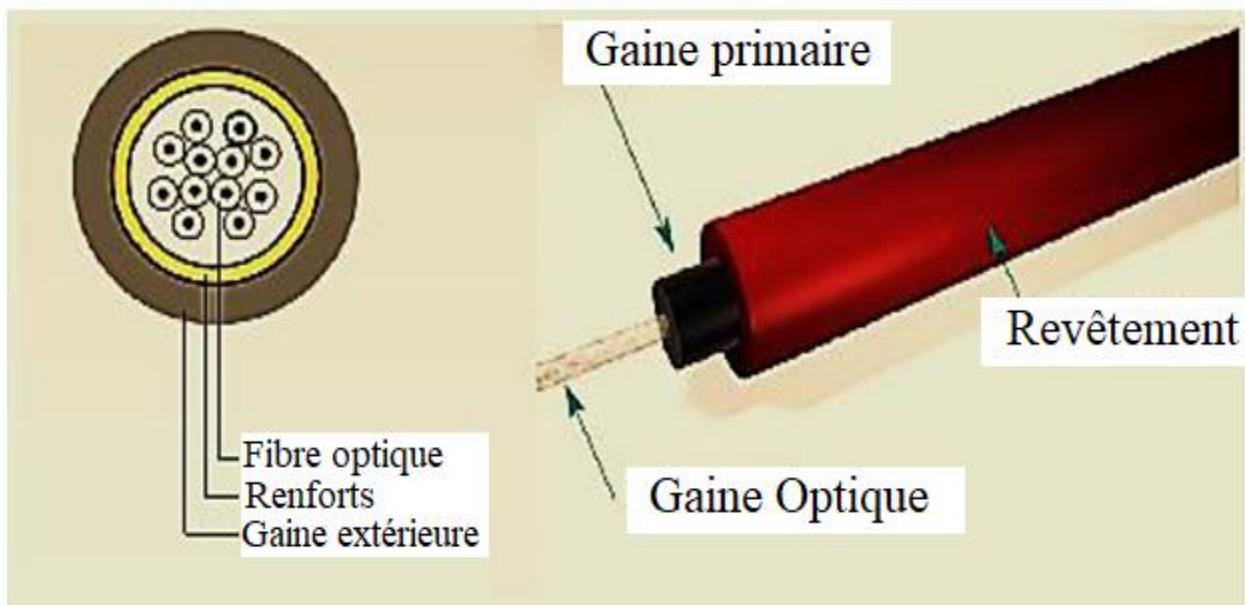


Figure 2.13 : Illustration des câbles à structure serrée

2.3.8 Liaison optique : la connectique

Dans cette partie nous allons étudier de façons détaillée liaison optique entre les fibres et les équipements du système et les fibres entre elles. Il y a le centrage et le raccordement. [2.05] [2.06]

2.3.8.1 Centrage géométrique des fibres

Le plus important dans la liaison optique c'est de connecter deux cylindres de quelques dizaines de microns. Une telle opération nécessite une très grande précision, les ajustages requièrent une dimension au micron près.

Souvent les défauts de raccordement des deux fibres sont :

- La mauvaise préparation des extrémités
- Un écartement exagéré
- Couche d'air trop importante
- Une différence de diamètre des cœurs. [2.05] [2.06]

Il peut y exister aussi une différence d'ouverture numérique, une inclinaison axiale, où les fibres forment un angle.

Ces défauts peuvent avoir des effets néfastes sur la transmission. Pour raccorder des fibres optiques, on distingue 3 méthodes :

- Jointage

Le jointage qui consiste à souder deux fibres entre-elles, bout à bout, par fusion des matériaux constitutifs de la fibre en utilisant une fusionneuse automatique.

- Epissurage

L'épissurage consiste, comme précédemment, à assembler bout à bout deux fibres, et de coller le tout par l'apport d'une colle spéciale de même indice optique que les fibres à raccorder.

- Connexion amovible.

Il s'agit d'utiliser deux pièces mécaniques qui s'emboîtent pour amener les deux fibres en vis-à-vis.

2.3.8.2 Raccordement permanent

L'opération consiste à réaliser une jonction irréversible de deux fibres optiques. Le procédé étant plutôt délicat oblige l'utilisation d'appareils plus sophistiqués et exige un personnel qualifié.

En général, on constate deux grandes variantes de procédé de raccordement : par fusion et par collage.

- Procédé par fusion

Le premier procédé par fusion consiste à appliquer une source de chaleur située à l'interface entre deux extrémités de la fibre mise bout à bout et préalablement alignées par un dispositif de guidage. A une température environ 2000 °C en quelque fraction de seconde, la soudure s'effectue en fusionnant les deux bouts.

- Procédé de *collage*

Le procédé de *collage* s'applique au niveau des jonctions ; on se sert d'une colle constituée de résine polymérisable par ultraviolet.

2.3.8.3 Raccordement démontable

Les techniques de raccordement des câbles optiques sur l'équipement de transmission, le brassage manuel des tronçons optiques dans un faisceau d'arrivée et de départ, la dérivation ou le changement de configuration, autant de manipulation qui requièrent une possibilité dans le temps et dans l'espace des performances optiques. [2.05] [2.06] [2.07]

Toutefois il existe deux grands types en matière de raccordement démontable : les connecteurs et les borniers optiques.

Les connecteurs, sont des dispositifs installés en extrémités de liaison, ont pour fonction de connexion-déconnexion.

Quant aux borniers optiques, ce sont tous les composants permettant le raccordement des fibres à l'aide de dispositifs mécaniques alignant les deux fibres à raccorder en les maintenant bloquées.

La figure 2.14 montre les différents types de connectiques utilisées pour la fibre optique.

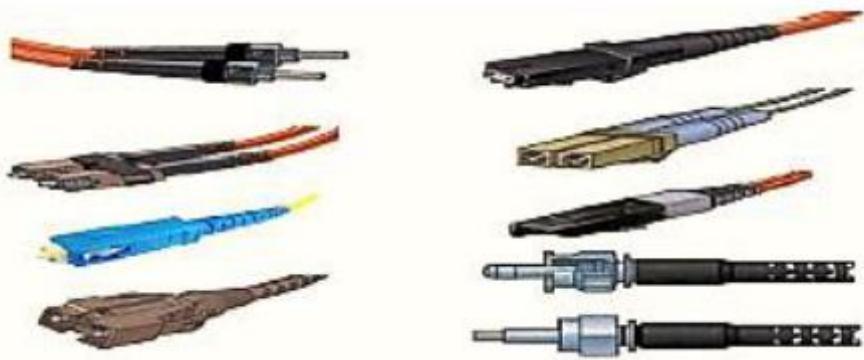


Figure 2.14 : Les différents types de connectiques à fibre optique

2.3.9 Coupleurs optiques

Le rôle d'un coupleur en optique est de repartir l'énergie lumineuse entrant vers chaque sortie, soit de manière équilibrée, soit dans un certain ratio. On peut voir un exemple d'application typique d'un tel équipement dans la figure 2.15. Ici, le coupleur effectue un test du signal provenant de la source. [2.07]

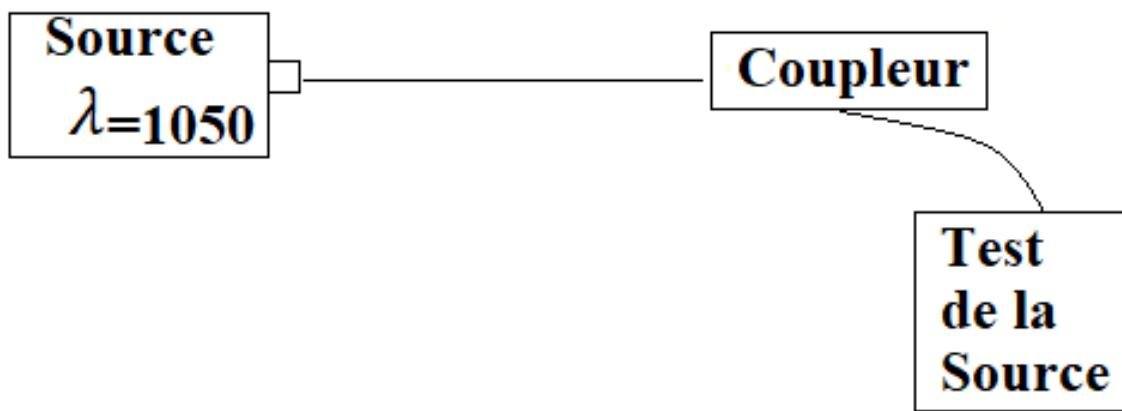


Figure 2.15 : Schéma d'un coupleur optique

2.4 Composants actifs

En parlant de composants actifs dans un système optique, on se doit de distinguer les composants au niveau de l'émission et de la réception qui diffèrent les uns des autres. [2.07]

2.4.1 Composants actifs au niveau de l'émetteur

Il s'agit en effet des différents types de diodes : les diodes Electroluminescente (LED) et les diodes laser.

Nous savions que la fibre optique transporte l'information sous forme de lumière. Pour effectuer cette transmission, le dispositif Interface Optique d'Emission ou IOE appelé également « transceiver », qui transforme le signal électrique de départ en signal optique doit être mis en place. Il s'agit essentiellement d'une diode LED ou d'une diode laser. [2.07]

2.4.1.1 Diodes ÉlectroLuminescentes ou LED

Les diodes LED sont constituées de matériaux semi-conducteurs comme l'Arséniure de Gallium (GaAs) à la longueur d'onde 850 nm, ou aussi de AlGaAs qui est une composition d'Arsenic, de Gallium et d'Aluminium à 1300 nm pour les couches actives.

C'est une jonction PN, qui, à la traversée du courant direct donne une émission de photon, due à la recombinaison de pair d'électron-trou.

Il est à souligner que l'émission optique est de nature spontanée non incohérente.

Soit la formule suivante :

$$P_I = f(P_s \cdot ON^2) \quad (2.09)$$

D'après cette relation, on constate que la puissance P_I injectée dans la fibre dépend alors de la puissance P_s disponible de la source et du carré de l'ouverture numérique ON de la fibre. L'allure du spectre d'émission d'une diode LED est donné par la figure 2.16. [2.07]

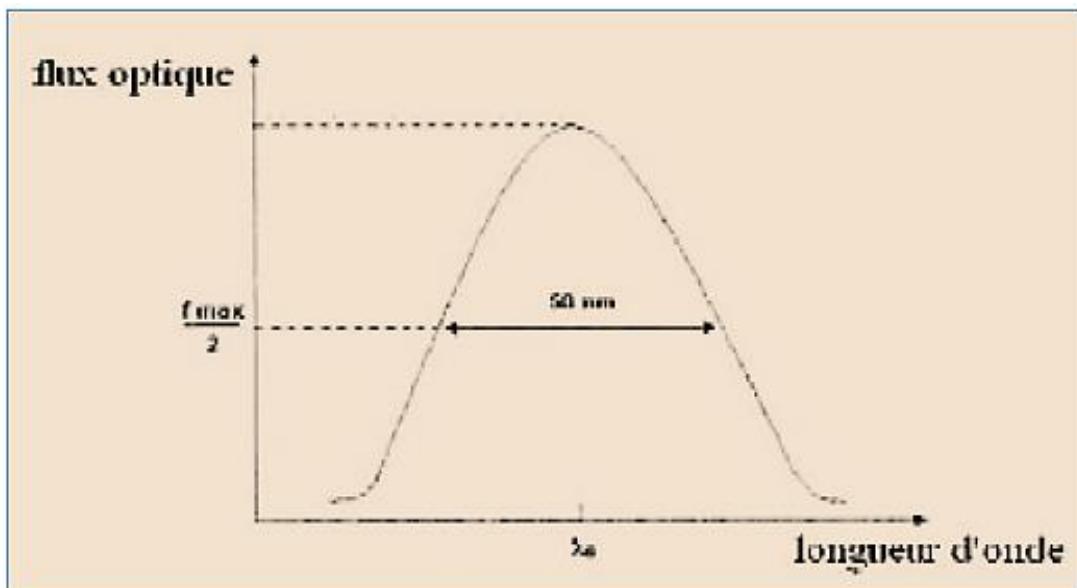


Figure 2.16 : Spectre d'émission d'une diode LED

2.4.1.2 Diodes Laser

Une amplification de lumière par émission stimulée de radiation est un dispositif qui amplifie la lumière et la rassemble en un étroit faisceau, le LASER. [2.07]

Un tel faisceau est cohérent de telle façon que tous les rayons ont la même longueur d'onde et se propagent en phase dans la même direction. Cette propriété rend la lumière laser extrêmement directionnelle et d'une grande pureté spectrale. [2.07]

L'avantage de l'utilisation des diodes lasers est qu'on peut avoir des puissances relativement élevées comparée à une diode LED. De plus, un rayon laser a une largeur spectrale faible et une directivité presque parfaite. Son aspect très fin la rend très compatible avec l'ouverture numérique d'une fibre monomode pour les liaisons longues distances. [2.07]

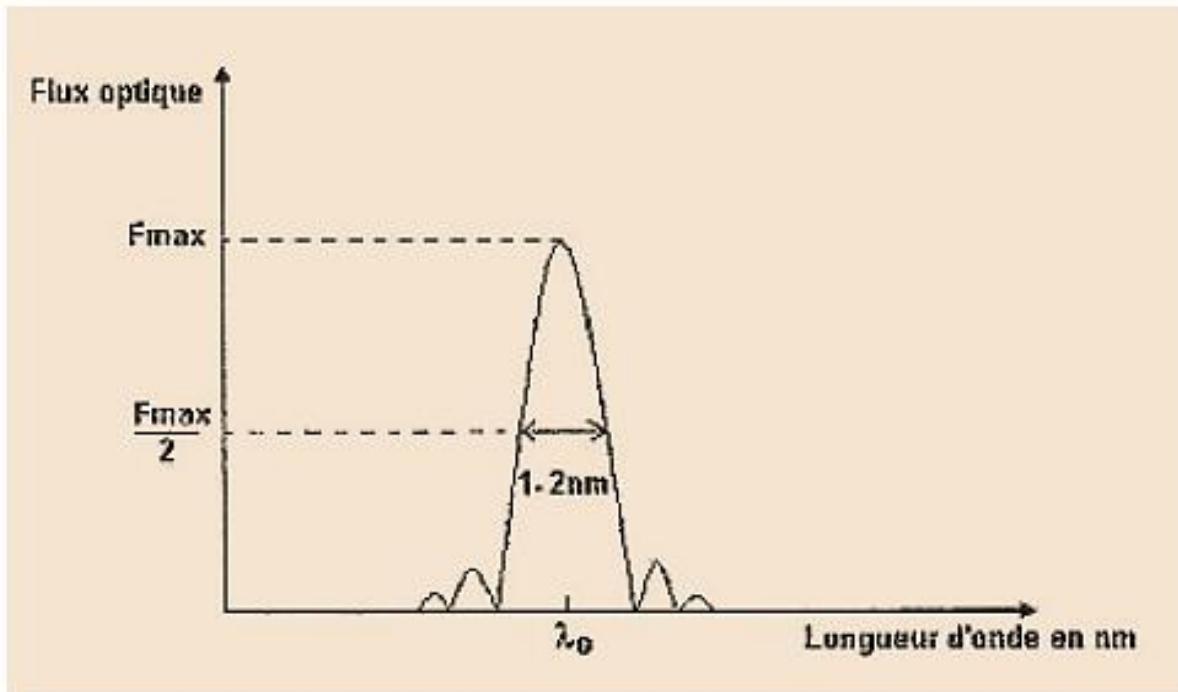


Figure 2.17 : Spectre d'émission d'une diode laser

2.4.2 Composants actifs au niveau du récepteur

A l'inverse de ce qui s'est produit à l'émission, l'IOR ou Interface Optique de Réception appelé également « détecteur », qui contient une photodiode, transforme le signal optique à la sortie du système en signal électrique. Aussi, ces composants sont des photodiodes.

Un récepteur optique est un photodétecteur convertissant la puissance optique incidente en courant électrique. [2.07]

2.4.2.1 Photodiodes PIN

Le principe consiste à créer entre les régions P et N fortement dopées une région déplétée pas ou peu de charges mobiles en choisissant un matériau dopé et appliquant un champ élevé.

Les transducteurs optoélectroniques les plus fréquemment utilisés pour les transmissions par fibre optique sont la photodiode P-intrinsic-N diode (PIN). [2.07]

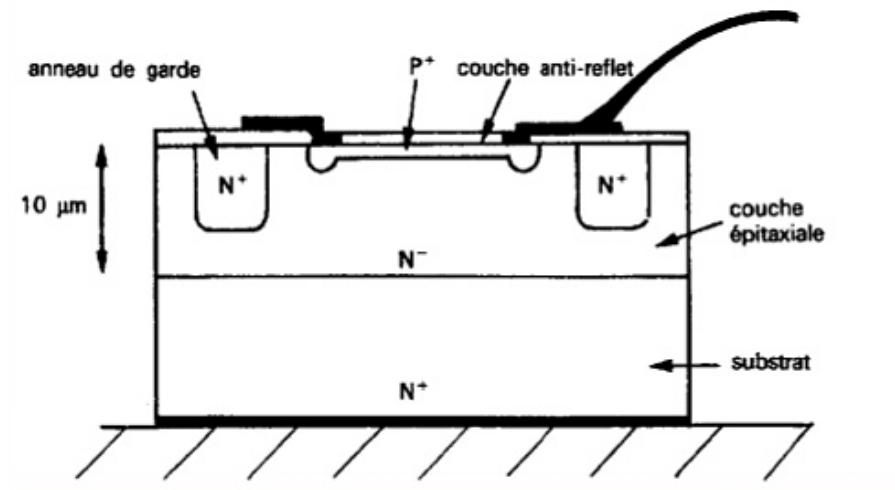


Figure 2.18 : Représentation schématique d'une photodiode PIN

Pour une photodiode PIN, la valeur moyenne du photo-courant est donnée par la relation :

$$I = S \cdot P = \frac{e \cdot \eta \cdot P}{h \cdot v} \quad (2.10)$$

Avec :

- e : la charge de l'électron
- P : la Puissance incidente
- h : la constante de Plank
- v : la fréquence optique
- S : le coefficient de conversion ayant la valeur typique de l'ordre de 0.7 ou 0.8 A/W
- η : le rendement quantique.

2.4.2.2 Photodiodes à avalanche

Il permet de disposer d'un gain interne en améliorant considérablement les conditions de réception de faibles puissances optiques en présence de bruit thermique et la profite de l'effet d'avalanche pour augmenter considérablement le courant de sortie. [2.07]

Pour la photodiode à avalanche PDA, la détection est caractérisée par le coefficient multiplicateur M qui est nombre moyen de porteur créé par ionisation dans la diode par rapport au nombre moyen de photons reçus. Il est donné par la relation :

$$M = \frac{1}{1 - \left(\frac{v}{v_B}\right)^n} \quad (2.11)$$

Avec :

- v : tension de polarisation.
- v_B : tension de claquage.
- n : facteur dépendant du dopage.

2.4.3 Amplificateurs optiques

Définition 2.03

L'amplification optique est l'amplification directe d'un flux de photons à travers un composant, longtemps utilisée seule après l'apparition des lasers dont elle est l'un des deux phénomènes indispensables avec le phénomène de résonance. [2.08]

Les informations sont transmises sur de très longues distances. Elles sont alors sujets à de multiples effets environnementaux qui dégradent le signal (atténuation, élargissement, déphasage...). [2.07] [2.08]

Ainsi, pour atteindre un niveau acceptable de l'état du signal à la réception, des procédés techniques sont adoptés. C'est pourquoi tout au long de la ligne de transmission, des répéteurs sont positionnés afin de régénérer le signal, de le remettre en forme pour la réception, voire de le resynchroniser.

En d'autres termes, la nécessité de mettre un amplificateur après la photodiode est critique pour assurer une correcte reconstitution du signal reçus. [2.07] [2.08]

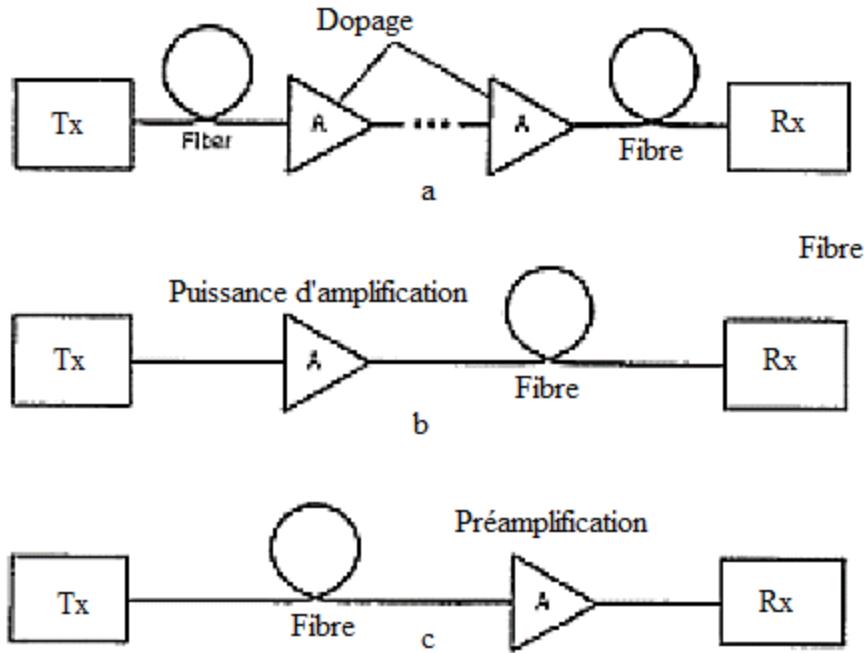


Figure 2.19 : Représentation schématique d'amplificateurs optiques

Il y a 3 types d'amplificateurs optiques dont on va parler ici : les amplificateurs à semi-conducteur, les amplificateurs optiques à fibre dopée et l'amplificateur Raman.

2.4.3.1 Amplificateur optique à semi-conducteurs (ou AOSC)

La structure de base d'un AOSC est peu différente de celle d'une diode laser. Contrairement aux lasers à semi-conducteur, il n'y a pas de miroirs aux extrémités mais un revêtement antireflet qui est déposé sur les faces afin de diminuer les réflexions de la lumière vers l'intérieur du circuit. [2.07] [2.08]

La lumière incidente entre dans le circuit, amplifiée, elle sort par l'autre extrémité pour être couplée dans la fibre.

Voici quelques caractéristiques à savoir : un gain élevé jusqu'à 30 dB, une puissance de saturation en sortie de 5 à 10 mW, une bande passante de 5 THz à une longueur d'onde de 1550 nm.

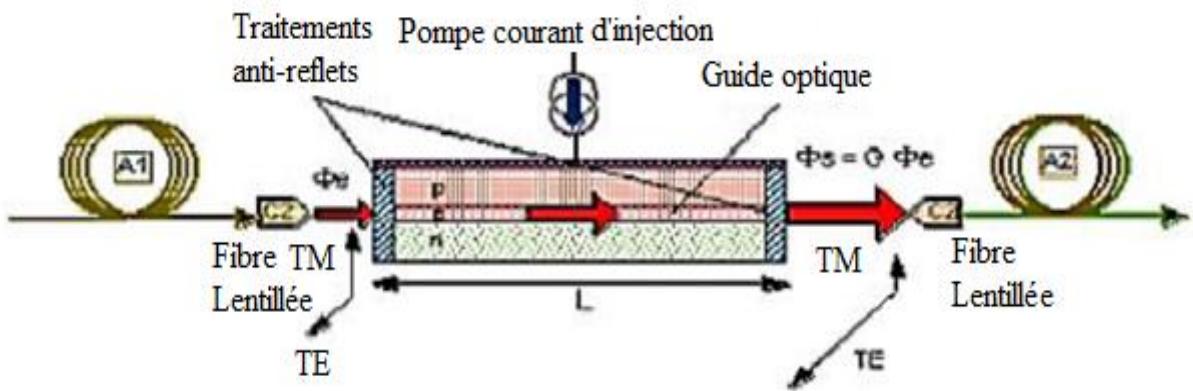


Figure 2.20 : Amplificateur optique à semi-conducteur

Définition 2.04 :

Un semi-conducteur est un matériau qui a les caractéristiques électriques d'un isolant, mais pour lequel la probabilité qu'un électron puisse contribuer à un courant électrique, quoique faible, est suffisamment importante. [2.07] [2.08]

2.4.3.2 Amplificateur optique à fibre dopée EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier)

En principe, un amplificateur optique absorbe l'énergie fournie par le système extérieur. On parle de « pompage ».

Ensuite, il restitue cette énergie au signal pour le renforcer et l'amplifier. Ainsi les amplificateurs à fibre qui sont disponibles commercialement fonctionnent dans la fenêtre de transmission à la longueur d'onde de 1550 nm. Un de leurs avantages est la simplicité du dispositif.

L'amplificateur optique à fibre dopée EDFA est principalement constitué d'une fibre active de quelques mètres de longueur, dopée avec des ions appropriés (Erbium), et connectée à la fibre de ligne, d'une pompe et d'un dispositif de couplage de la lumière de la pompe vers la fibre dopée. [2.07] [2.08]

Dans la plupart des cas, la pompe est un laser à semi-conducteur. Le couplage de la lumière de la pompe dans la fibre est obtenu à l'aide de multiplexeur.

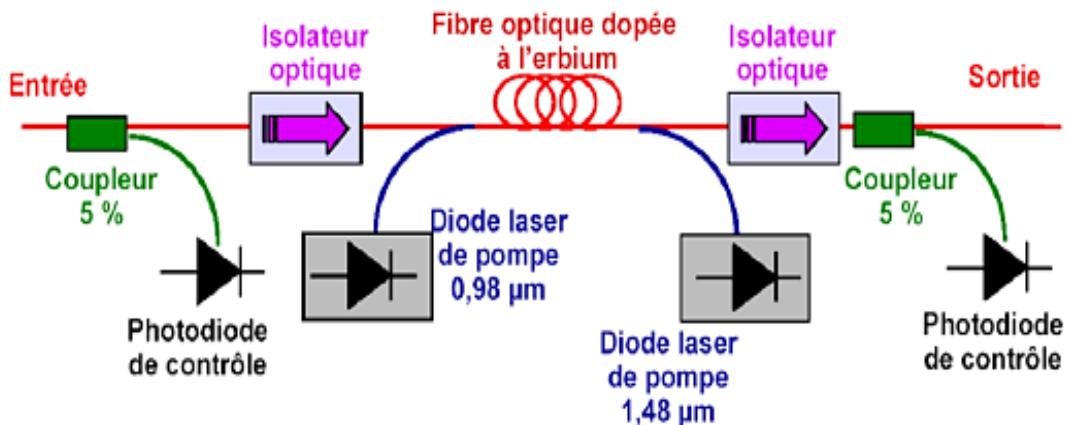


Figure 2.21 : Amplificateur optique à fibre dopée

Il est habituel d'ajouter deux isolateurs (diode optique) : une à l'entrée, l'autre à la sortie, qui ne laissent passer la lumière que dans un sens afin d'éviter toutes les réflexions qui pourraient créer une cavité, faire osciller le dispositif et le transformer en laser 980 et 1480 nm sont les deux longueurs d'onde de pompe les mieux adaptées à l'EDFA, et des diodes lasers à semi-conducteur sont disponibles à ces longueurs d'onde.

En général, les EDFA possèdent un gain de 25 à 45 dB et des puissances de saturation allant de 1 à 10 mW (0 à 10 dBm). [2.07] [2.08]

Ils ont une large bande passante (1530-1560 nm) pour laquelle le gain est quasiment identique, ce qui rend intéressant ces amplificateurs quand on veut amplifier simultanément plusieurs signaux multiplexés en longueur d'onde. [2.08]

2.4.3.3 Amplificateur de RAMAN

De nouveaux amplificateurs optiques tels que les amplificateurs Raman prennent une part non négligeable dans les systèmes de télécommunications. Ils sont basés sur le principe de la diffusion Raman, qui est un effet non linéaire à deux photons dans lequel un photon de pompe est absorbé et un photon de plus faible énergie est émis en même temps qu'un photon.

Un tel phénomène peut être spontané s'il n'y a pas de photon signal, ou stimulé par la présence d'un photon signal. [2.08]

Ainsi, dans le cas de l'amplificateur Raman, l'onde incidente, dite « onde de pompe », stimulée par l'onde signal, va créer une autre onde signal et un phonon. L'amplification est alors réalisée. Comme pour les autres amplificateurs optiques, l'amplificateur Raman a besoin d'une source externe, une source optique. Des lasers YAG sont les plus souvent utilisés dans ce cas, ils émettent une longueur d'onde inférieure à celle du signal. [2.08]

L'avantage principal de ces lasers est d'être accordable sur une très grande plage de longueur d'onde. Le gain obtenu peut atteindre quelques dizaines de décibels, mais une saturation qui s'accompagne d'une forte dégradation du rapport signal sur bruit (l'émission spontanée continuant à être amplifiée) peut apparaître. La limite en puissance est due à la génération d'une onde autre que l'onde signal lors de la diffusion Raman.

2.4.4 Evolution de la capacité des fibres optiques suivant les générations

Dans l'historique, nous avons énoncé que plusieurs générations de fibres optiques. Ils ont évolué au fil du temps avec une amélioration des capacités.

Nous allons aborder un à un les caractéristiques de ces générations de fibres à travers les fenêtres spectrales. [2.09]

Définition 2.05 :

La dispersion chromatique est définie comme la dérivée du temps de propagation d'un signal quasi monochromatique sur une unité de longueur en fonction de la longueur d'onde [2.09] :

$$d_c = \frac{d\tau_g}{d\lambda} \quad (\text{ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})) \quad (2.12)$$

Où

- τ_g : est le temps de groupe, soit l'inverse de la vitesse de groupe
- λ : longueur d'onde.

Définition 2.06 :

Le *multiplexage en longueur d'onde* sur une fibre consiste à mieux utiliser la bande passante de la fibre, c'est une solution économique qui permet de maximiser la capacité de celle-ci. Les canaux peuvent être identifiés, soit par la fréquence de la porteuse optique f , soit par la longueur d'onde λ , les deux étant reliées par la relation simple [2.10] :

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (2.13)$$

2.4.4.1 Première génération

- Fibres optiques multimodes
- Autour de $\lambda = 850$ nm (1ère fenêtre spectrale).
- LED ou lasers multimodes

- Atténuation élevée.
- $B = 45 \text{ Mbit/s}$, $L = 10 \text{ km}$.
- Matériaux plus économiques : liaisons peu coûteuses à courtes distances ou en réseau local.
- N'est utilisée qu'en multimode.

2.4.4.2 Deuxième génération

- Fibres optiques monomodes.
- Autour de $\lambda = 1300 \text{ nm}$ (2ème fenêtre spectrale).
- Pertes plus faibles ($0,33 \text{ dB/km}$)
- Dispersion chromatique nulle.
- Lasers multimodes.
- $B > 1 \text{ Gbit/s}$, $L > 50 \text{ km}$.
- Ce type de fibre est encore largement utilisée.

2.4.4.3 Troisième génération

- Fibres optiques monomodes.
- Autour de $\lambda = 1550 \text{ nm}$ (3ème fenêtre spectrale).
- Minimum de pertes ($0,17 \text{ dB/km}$).
- Dispersion non nulle.
- Lasers (monomodes) et amplificateurs performants
- $B > 10 \text{ Gbit/s}$, $L = 60 - 70 \text{ km}$.
- Deux sous-bandes : C {1525-1565} nm, L {1565-1625} nm.
- C'est la fenêtre de choix pour quasiment toutes les applications modernes

2.4.4.4 Quatrième génération

- Amplificateurs optiques performants, Fibres optiques monomodes.
- Autour de $\lambda = 1550 \text{ nm}$ (3ème fenêtre spectrale).
- Multiplexage en longueur d'onde (plusieurs porteuses dans une même fibre optique).
- Minimum de pertes ($0,17 \text{ dB/km}$).
- Dispersion non nulle.
- $B > 10 - 40 \text{ Gbit/s}$, $L = 60 - 80 \text{ km}$ entre les amplificateurs, plusieurs milliers de kilomètres entre l'émetteur et le récepteur.

La figure 2.22 suivante donne une illustration de ce que nous venons de décrire. [2.11]

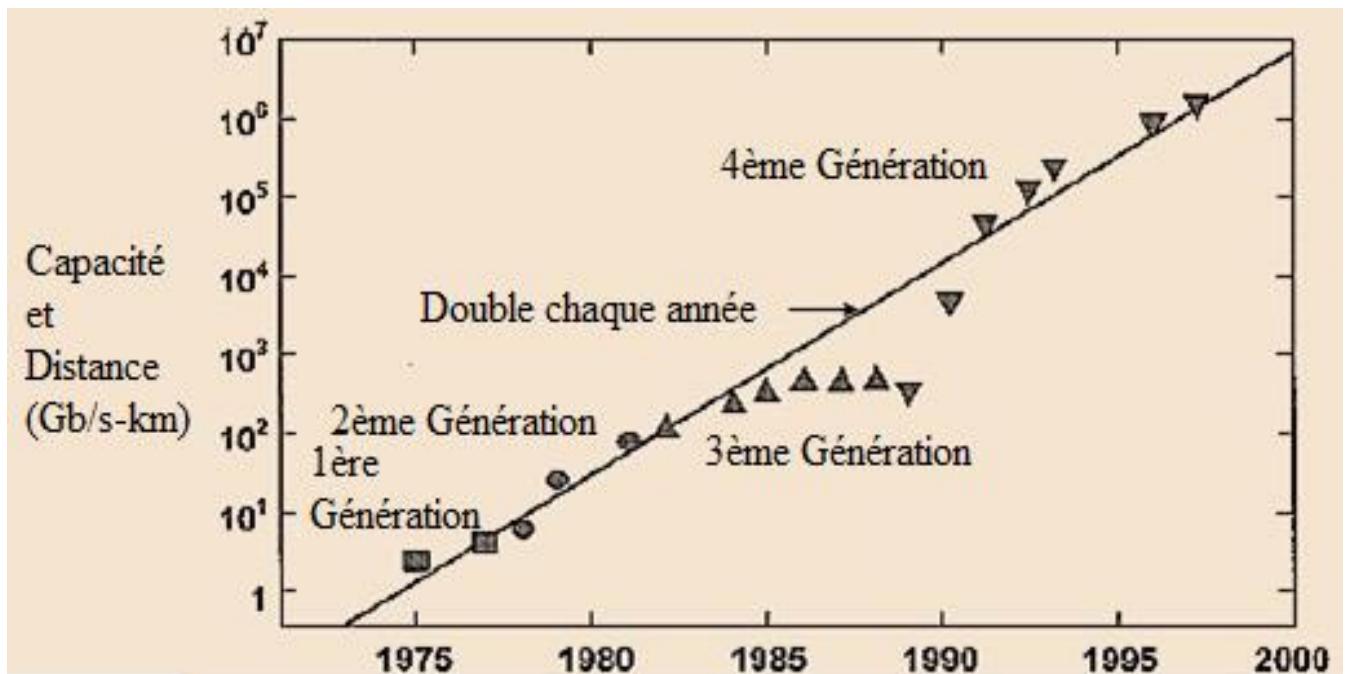


Figure 2.22 : Evolution de capacités des fibres

2.5 Conclusion

A travers ce présent chapitre, nous avons récapitulé les généralités concernant le système de transmission optique.

Nous avons mené une étude détaillée des caractéristiques fondamentales de la fibre optique, l'élément clé de cet ouvrage. Puis le mode de propagation de la lumière dans la fibre termine ce chapitre. Nous allons ensuite étudier l'amplificateur à l'erbium dans le prochain chapitre.

CHAPITRE 3 : AMPLIFICATION A L'ERBIUM

Depuis plus que 25 ans, la fibre optique est devenue le moyen le plus utilisé pour transporter tout type d'informations comme l'internet, la téléphonie, la vidéo.

C'est notamment depuis les années 1966 que les chercheurs Kao et Hockman ont pu développer l'activité de recherche sur les fibres optiques à base de silice et ainsi permettre la réalisation des premières fibres optiques à faibles pertes ($>20\text{dB/Km}$) dans l'infrarouge.

Jusqu'aux début des années 1990 l'amplification du signal pour les fibres longues distances étaient réalisées par des dispositifs optoélectroniques qui nécessitaient une conversion électrique-optique en entrée et optique-électrique en sortie ce qui limitait le débit d'information à 2 Gbit/s.

C'est ainsi que des chercheurs de Southampton et de Bell Laboratories ont mis au point une technique qui consiste à régénérer les signaux au cœur même de la fibre par le biais de l'amplification optique par émission stimulée.

C'est à partir de cet instant que les amplificateurs optiques dopés à l'erbium (EDFA) ont fait leurs apparitions, les ions erbium incorporés dans les fibres permettaient de pouvoir transmettre simultanément des signaux à différentes longueurs d'ondes, ce qui donne la possibilité aux fibres de propager un débit d'information de 10Tbit/s.

3.1 Spectroscopie des Terres rares

Définition 3.01 :

La *spectroscopie*, ou spectrométrie, est l'étude expérimentale du spectre d'un phénomène physique, c'est-à-dire de sa décomposition sur une échelle d'énergie, ou toute autre grandeur se ramenant à une énergie. [3.01]

Lorsqu'un signal est transmis sur de très longues distances, il peut subir une forte atténuation ce qui implique la perte du signal. Afin d'éviter ces pertes, il faut donc amplifier ce signal.

A l'origine de ce phénomène d'amplification optique se trouve l'interaction de la lumière avec les ions terres rares.

Cette interaction donnera donc naissance à des transitions entre les différents niveaux d'énergies de ces ions.

3.1.1 Les ions Terres Rares

Définition 3.02 :

Les *terres rares* sont un groupe de métaux aux propriétés voisines comprenant le scandium $_{21}\text{Sc}$, l'yttrium $_{39}\text{Y}$, et les quinze lanthanides. Ces métaux sont, contrairement à ce que suggère leur appellation, assez répandus dans l'écorce terrestre, à l'égal de certains métaux usuels. [3.01]

Les Terres rares sont une famille de 15 éléments représentant le groupe des lanthanides. Le choix de ces ions pour les amplificateurs est dû à leurs configuration électronique, en effet la sous couche 4f interne est responsable des propriétés optiques des ions terres rares. Parmi ces ions, celui le plus couramment utilisé pour les télécoms est l'ion Er^{3+} . [3.01] [3.02]

Cet ion est utilisé comme dopant dans les amplificateurs à fibres, car à la longueur d'onde de 1,55 μm correspond un minimum d'atténuation des fibres de silice et d'autre part, les électrons issus des niveaux d'énergie de la couche 4f provoquent des émissions radiatives autour de 1,55 μm .

Ainsi en utilisant comme dopant les ions erbium, nous formons un amplificateur optique appelé EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier).

Dans la classification périodique des éléments, les terres rares appartiennent à la famille des lanthanides (figure 3.01). [3.01] [3.02]

La configuration électronique de ces éléments est la suivante : $[\text{Xe}] 6s^2 4f^{0-14} 5d^{0-1}$. Leurs couches internes possèdent la même configuration que le Xénon (Xe). Les couches externes constituées des couches 6s, 4f et 5d sont à l'origine des propriétés optiques des lanthanides.

Le remplissage de ces couches respecte la règle de Klechkowski. La couche 6s étant saturée, la couche 4f se remplit progressivement jusqu'à saturation (soit 14 électrons) puis commence le remplissage de la couche 5d. Seuls le Lanthane et le Gadolinium font exception puisque que leurs couches 5d portent un électron alors que leurs couches 4f sont non saturées. L'ionisation de ces éléments donne généralement lieu à la formation d'ions trivalents (3+), les électrons étant « prélevés » sur les couches 6s et 4f. [3.01] [3.02]

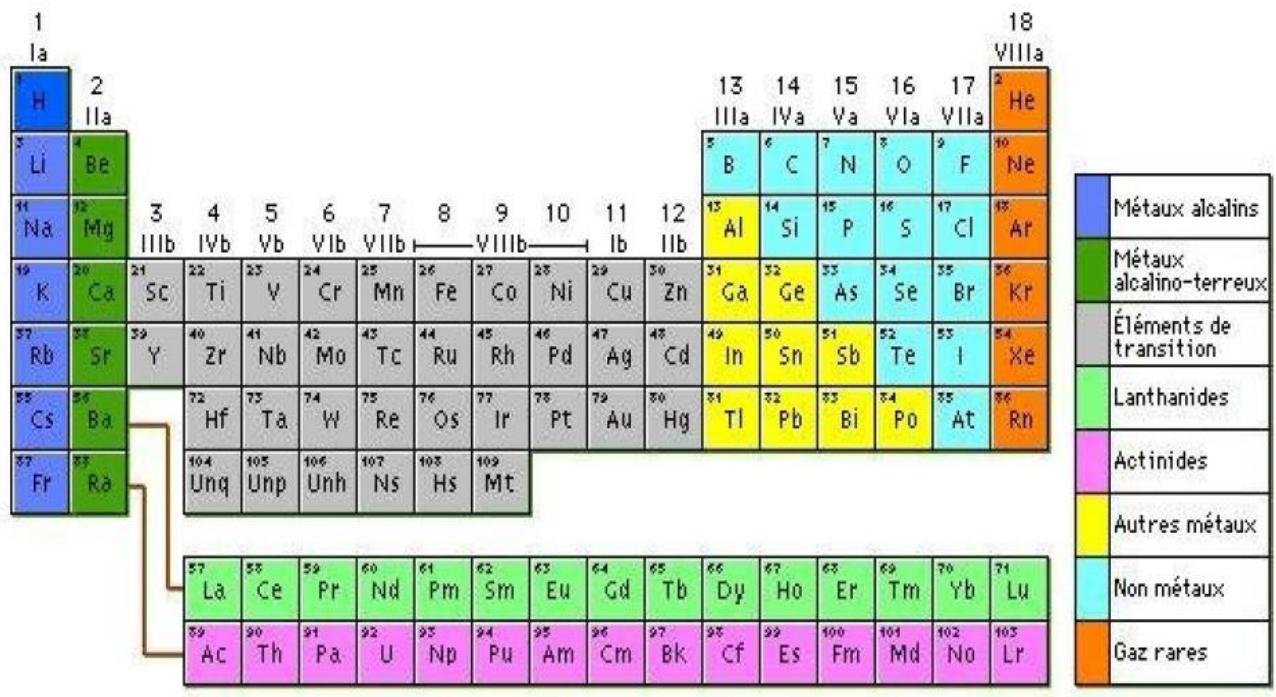


Figure 3.01 : Place des lanthanides dans la classification périodique des éléments

3.1.2 Principe

Tous les éléments chimiques de la classification périodique sont constitués d'un noyau autour duquel gravite un certain nombre d'électrons dits à l'état fondamental. Si on leur apporte l'énergie suffisante, ces électrons peuvent passer sur des niveaux d'énergie plus élevés. On parle « d'excitation » des atomes. [3.02]

L'énergie nécessaire pour exciter ces atomes peut être apportée de différentes manières : décharges électriques, flashes ou photons (flux lumineux) qui sont alors absorbés. Les atomes excités ne sont pas dans un état stable et tendent toujours à revenir à l'état fondamental : c'est la « désexcitation ».

Au cours de cette désexcitation, l'énergie peut être restituée sous forme de photons (transition radiative) ou sous forme de phonons qui sont des quanta d'énergie associés à des vibrations de la matière (transition non radiative).

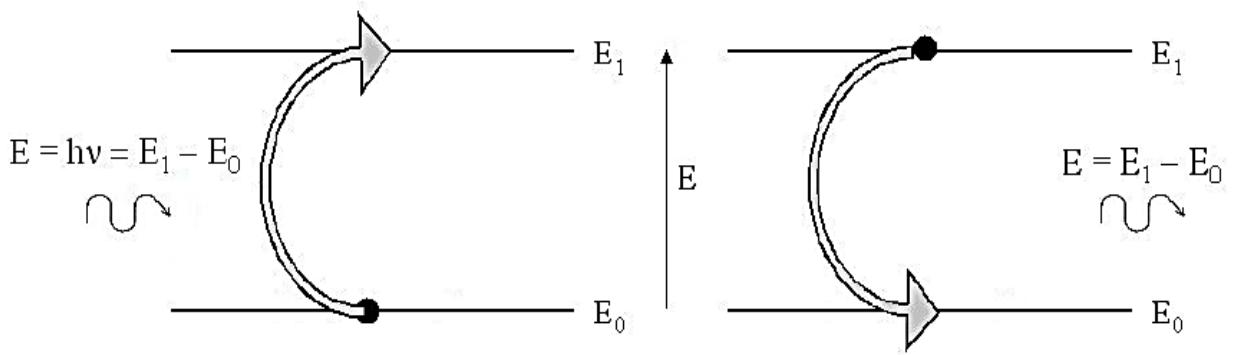


Figure 3.02 : représentation schématique :

- a) *L'excitation d'un atome par absorption d'un photon.*
- b) *La désexcitation d'un atome accompagnée de l'émission d'un photon.*

Sur la figure un apport d'énergie E égal à la différence d'énergie entre les deux niveaux E_0 et E_1 :

$$E = E_1 - E_0 \quad (3.01)$$

Cette équation permet à un électron de passer du niveau fondamental (E_0) au niveau d'énergie E_1 plus élevé. Le phénomène de désexcitation radiative est schématisé sur figure b. Un électron excité retombe à l'état fondamental. Ce phénomène s'accompagne de l'émission d'un photon d'énergie $E_1 - E_0$. [3.02]

3.1.3 Emissions spontanée et stimulée

Définition 3.03 :

L'émission spontanée est, en physique atomique, le processus de désexcitation d'un électron favorisé en illuminant l'atome d'une lumière ayant une longueur d'onde correspondant à l'énergie de transition entre les deux états électroniques. [3.03]

Définition 3.04 :

L'émission stimulée (à l'inverse de l'émission spontanée où le photon peut être émis dans n'importe quelle direction), les deux photons (le photon incident et le photon émis) sont émis dans la même direction. L'émission stimulée est un processus de désexcitation d'un électron favorisé en illuminant l'atome d'une lumière ayant une longueur d'onde correspondant à l'énergie de transition entre les deux états électroniques. [3.03]

Les phénomènes d'excitation et de désexcitation des atomes sont à la base de l'amplification optique. Dans ce paragraphe, nous allons nous intéresser plus particulièrement à l'émission des photons.

Une particule (atome, ion ou molécule) excitée ne peut pas rester indéfiniment dans cet état physique. Elle se désexcite naturellement vers un niveau d'énergie inférieure en émettant spontanément un photon dans le cas d'une transition radiative (émission spontanée). Le photon émis possède une direction, une phase et une polarisation aléatoire et son énergie est égale à la différence d'énergie entre les 2 niveaux mis en jeu. On désigne par « durée de vie » le temps au bout duquel la densité de population d'un niveau a été divisée par E_1 une fois l'excitation terminée. [3.04]

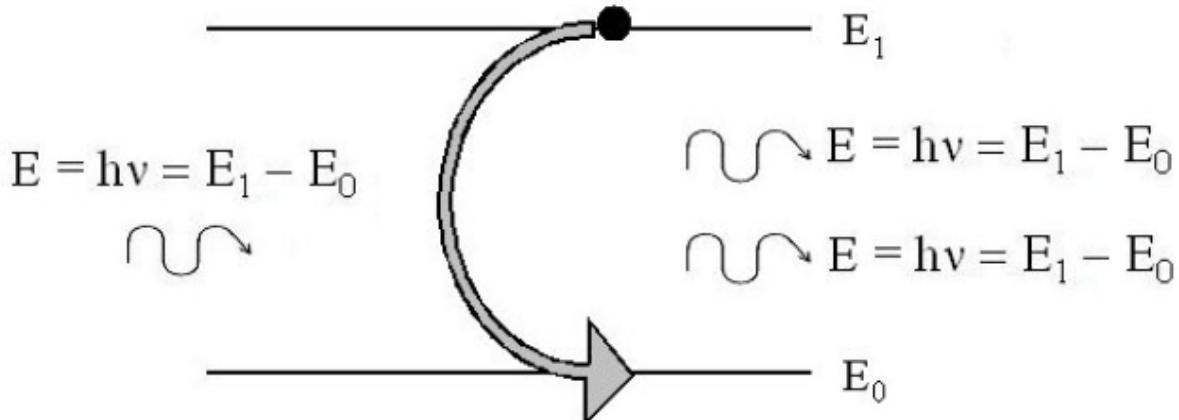


Figure 3.03 : Principe de l'émission stimulée : désexcitation d'un ion du niveau E_1 vers le niveau E_0 provoquée par un photon incident d'énergie $E = E_1 - E_0$

Sur la figure a été représenté le cas d'un atome excité sur le niveau d'énergie E_1 et soumis à l'influence d'un photon incident d'énergie égale à $E_1 - E_0$. Cette influence induit la désexcitation de l'atome vers le niveau E_0 , avec émission d'un photon (émission stimulée). Le photon émis est en tout point identique au photon incident (direction, phase, polarisation, énergie).

C'est ce principe d'émission stimulée qui est à l'origine de l'amplification optique. Avec un tel système, c'est un photon « signal » (c'est-à-dire un photon du flux lumineux que l'on souhaite amplifier à une longueur d'onde λ) qui est absorbé pour exciter un atome et un autre photon est ensuite restitué par émission stimulée. Globalement, le nombre de photons en sortie du dispositif est au plus égal à celui en entrée et ce système ne permet pas d'amplifier un rayonnement lumineux. [3.04]

3.2 Laser à fibre dopée : aspects technologiques

Définition 3.05 :

Les *terres rares* sont un groupe de métaux aux propriétés voisines comprenant le scandium $_{21}\text{Sc}$, l'yttrium $_{39}\text{Y}$, et les quinze lanthanides. [3.05]

Pour obtenir une fibre optique amplificatrice, c'est à dire permettant d'amplifier un signal d'entrée par un certain coefficient de gain, il faut ajouter un dopant lors de la fabrication de la préforme de la fibre de silice. On trouve principalement sept ions de terre rare utilisés comme dopant : le néodyme (Nd^{3+}), l'erbium (Er^{3+}), l'ytterbium (Yb^{3+}), le thulium (Tm^{3+}), l'holmium (Ho^{3+}), le samarium (Sm^{3+}) et le praséodyme (Pr^{3+}). Cette gamme de dopant permet aux lasers à fibre de couvrir un large éventail de longueurs d'onde d'émission, comme l'indique la figure 3.03. [3.05]

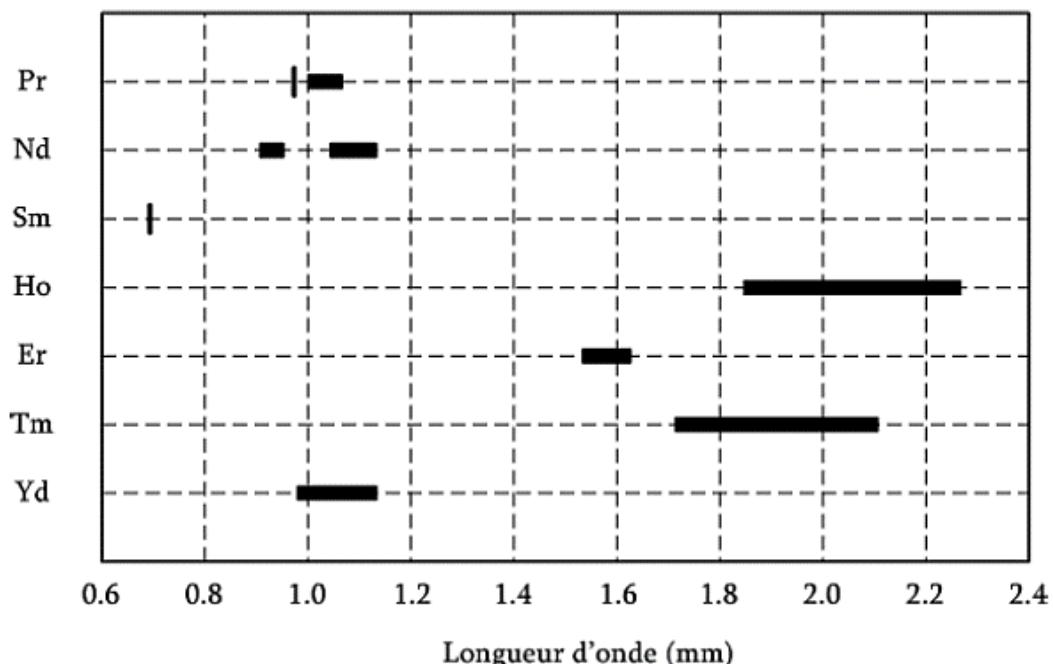


Figure 3.04 : Longueurs d'onde d'émission obtenues avec différents ions de terre rare

Les barres sombres sur ce graphique traduisent le fait que plusieurs démonstrations expérimentales de lasers ont été faites pour des longueurs d'onde d'émission se situant dans les plages spectrales correspondantes. L'ion erbium a été intensivement étudié en vue de son application comme milieu de gain pour la réalisation de composants actifs utilisables dans le domaine des télécommunications optiques. En effet, afin de pallier aux pertes intrinsèques de

la fibre optique, servant de lien pour la transmission de l'information, la communauté scientifique a recherché un moyen efficace d'amplifier la lumière sans transformer le signal optique en puissance électrique. L'erbium s'est alors imposé comme un élément essentiel des systèmes de télécommunication car sa bande spectrale d'émission correspond à la région spectrale où les pertes du lien sont minimales. De plus, il s'est avéré possible de réaliser des fibres optiques dopées avec des ions erbium, ce qui facilite l'intégration de ce type de milieu de gain dans les systèmes de communication. [3.05]

L'étude de la structure spectroscopique d'un ion de terre rare, que l'on envisage d'utiliser comme élément de gain, est d'un grand intérêt. La structure des niveaux d'énergie de l'ion Er^{3+} est relativement complexe. Comme le montre la figure 3.04, l'ion erbium présente plusieurs bandes d'absorption. Cependant, les niveaux d'énergie correspondant à ces différentes bandes n'ont pas toutes la même efficacité de rendement. En effet, dans certains cas les transitions non-radiatives (en pointillé sur la figure 3.04), convertissent l'énergie de pompe en modes de vibrations, les phonons. Cette énergie est alors perdue pour la génération de l'onde lumineuse.

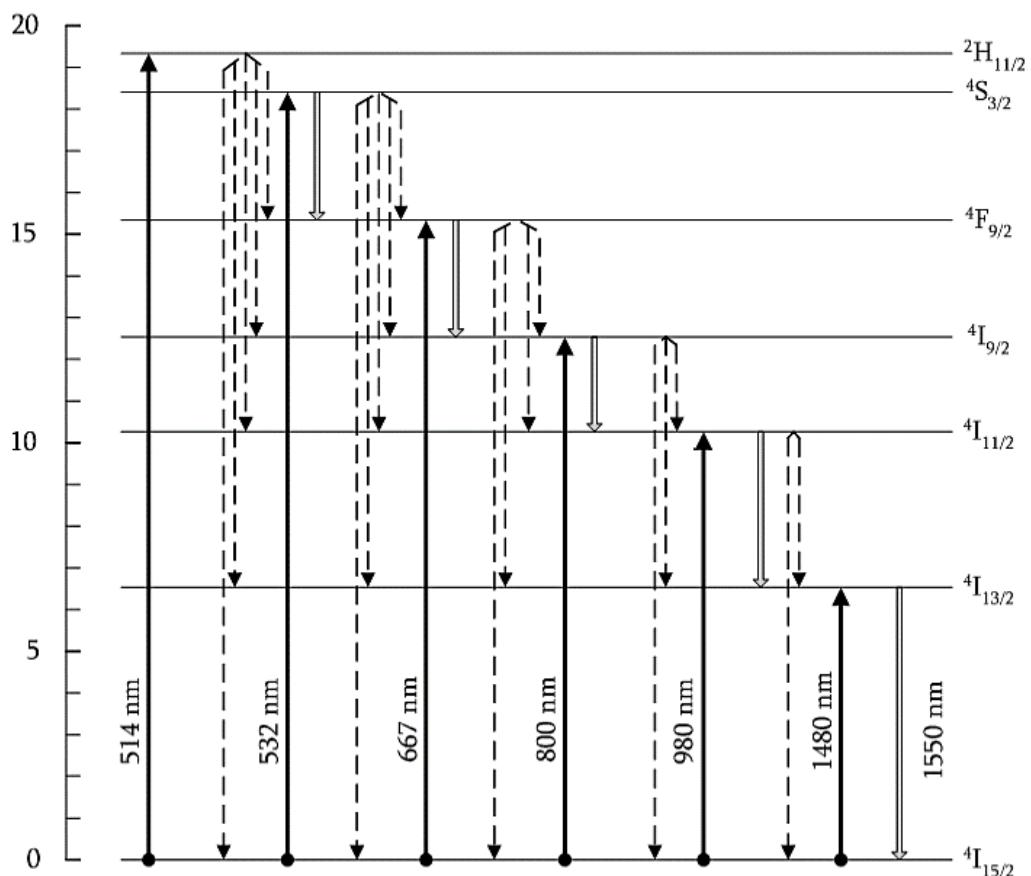


Figure 3.05 : Structure spectroscopique de l'ion erbium

La transition la plus efficace est celle qui relie le niveau $4I^{13/2}$ au niveau $4I^{15/2}$. La bande spectrale d'émission correspondante à cette transition est centrée autour de 1550 nm, ce qui correspond précisément à la bande de faibles pertes de la silice qui constitue les liens optiques. Les longueurs d'onde de pompe couramment utilisées pour solliciter cette transition sont le 980 nm et le 1480 nm pour lesquelles nous avons à notre disposition des diodes lasers à semi-conducteurs délivrant plusieurs centaines de milliwatts. Celles-ci permettent d'obtenir un pompage relativement performant, avec un rendement de conversion électrique-optique proche de 60%. [3.05] [3.06]

Les lignes de la figure 3.04, schématisant les niveaux d'énergie, ne sont en fait qu'une représentation simpliste du milieu. Une représentation plus réaliste représenterait les niveaux d'énergie de l'erbium en bandes.

Cet élargissement de niveau est dû à l'effet Stark. En effet, en présence d'un champ électrique externe, comme celui causé par la matrice de verre contenant les ions erbium, les niveaux d'énergie se séparent pour former une bande d'énergie. Dans le cas de l'erbium, ces sous-niveaux sont au nombre maximal de 8 pour le niveau fondamental et de 7 pour le niveau supérieur $4I^{13/2}$.

Le principal inconvénient de l'ion erbium est qu'il est peu soluble dans une matrice de verre. Ceci pose des problèmes lorsqu'il s'agit de réaliser un fort dopage d'une fibre optique dans le but d'en extraire le maximum de puissance. Dans ce cas, les ions erbium ont tendance à se rapprocher les uns des autres et forment ainsi des agrégats de deux (appairage), voire de plusieurs ions. Dans le cas des lasers de puissance, ces agrégats sont à l'origine d'un régime d'auto-pulsation. Afin de diminuer cet effet, il est cependant possible d'utiliser l'aluminium comme co-dopant. L'aluminium aide à augmenter la solubilité de l'erbium et réduit substantiellement la formation de ces agrégats. [3.05] [3.06]

3.3 Equations d'évolution

Définition 3.06 :

Le dopage dans le domaine des semi-conducteurs, est l'action d'ajouter des impuretés en petites quantités à une substance pure afin de modifier ses propriétés de conductivité. [3.06]

Dans le cadre de notre étude, nous considérons le cas de fibres optiques dopées Er^{3+} destinées à l'amplification autour de 1550nm pour les télécommunications optiques. Nous allons maintenant déterminer les équations qui régissent l'évolution des puissances de pompe, de signal et de la densité spectrale de bruit, dans le cas du pompage à 980nm. L'objectif de ce

travail est de connaître les valeurs de ces grandeurs en fonctions des paramètres tels que la longueur de fibre ou la concentration en ions dopants. Une fois ces relations définies, il sera possible d'accéder au gain de l'amplificateur, caractéristique indispensable pour le reste de notre étude. [3.06]

Sur la figure 3.05, nous rappelons les niveaux et les différentes transitions mis en jeu pour l'amplification de signaux à 1550nm par l'ion erbium pompé à 980nm. On définit par « taux de transition » entre deux niveaux, le nombre de transition par seconde entre ces niveaux.

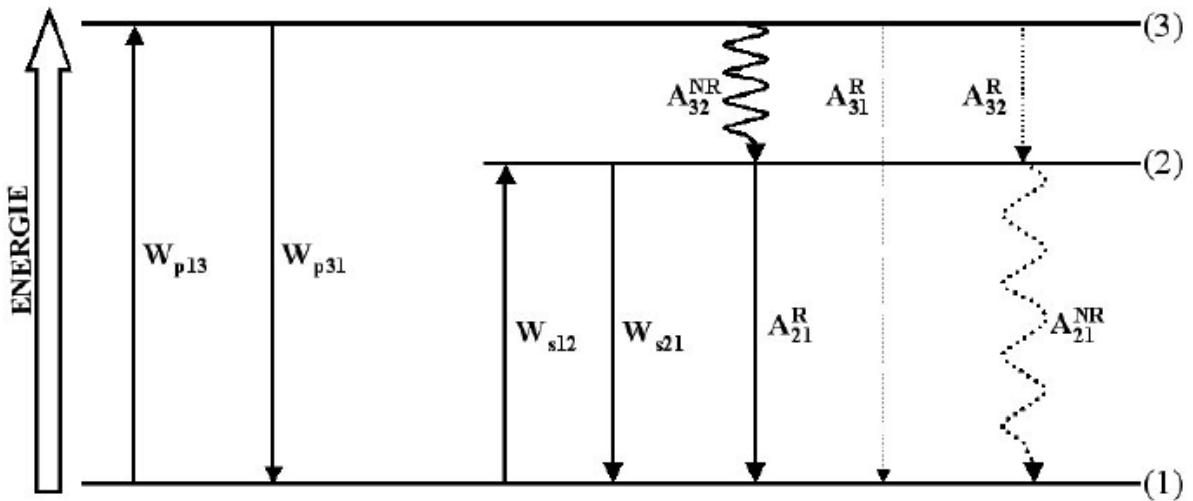


Figure 3.06 : Diagramme d'énergie de l'ion erbium et taux de transition entre les niveaux lors d'un pompage à 980nm (A : transition spontanée, W : transition stimulée)

Les niveaux (1), (2) et (3) correspondent respectivement aux niveaux $^4I_{15/2}$, $^4I_{13/2}$ et $^4I_{11/2}$. W_{p13} représente le taux d'absorption d'un photon de pompe par un ion du niveau (1) et W_{p31} est le taux d'émission stimulée à la longueur d'onde de pompe. Pour obtenir les meilleures performances en termes d'amplification, nous savons qu'il faut chercher une inversion de population le plus grand possible, voire quasi-totale. [3.06]

Pour cela, les ions actifs doivent avoir une forte valeur de W_{p13} et un taux W_{p31} faible, afin qu'une proportion maximale d'entre eux soit excitée par la pompe vers le niveau (3) et puisse participer au processus d'amplification. On peut remarquer l'existence d'un certain nombre de transitions spontanées à partir du niveau (3). On note A_{31}^R et A_{32}^R les taux de transitions radiatives respectivement de (3) vers (1) et de (3) vers (2), et A_{32}^{NR} le taux de transition non radiative de (3) vers (2). [3.06]

Par la suite on considérera que A_{32}^{NR} est suffisamment grand devant W_{p31} , A_{31}^R et A_{32}^R pour que ces trois taux puissent être négligés. On note W_{s12} et W_{s21} respectivement les taux d'absorption

et d'émission stimulée du signal. W_{s12} est d'autant plus faible et les performances en termes de gain de l'amplificateur sont d'autant meilleures que l'inversion de population est plus élevée. Enfin, on note A_{21}^R et A_{21}^{NR} les taux de transitions radiatives et non radiatives dues à la désexcitation spontanée des ions au niveau $^4I_{13/2}$. Dans le cas de l'erbium, on a $A_{21}^R \gg A_{21}^{NR}$ on pourra par la suite négliger le taux de transition non radiative du niveau (2) vers (1). On note généralement τ la durée de vie du niveau métastable $^4I_{13/2}$ et on montre que $\tau = 1 / A_{21}^R$.

Rappelons que la désexcitation spontanée des ions au niveau métastable au cours de transitions radiatives est un phénomène à l'origine du bruit de l'amplificateur. [3.06]

3.4.1 Equations d'évolution des densités volumiques de population

Définition 3.07 :

La *densité* ou densité d'un corps ou densité relative d'un corps est le rapport de sa masse volumique à la masse volumique d'un corps pris comme référence. [3.07]

Définition 3.08 :

Une *population* est un ensemble d'éléments partageant une ou plusieurs caractéristiques qui servent à les regrouper. [3.07]

Soient $N1$, $N2$ et $N3$ les densités volumiques de population des niveaux d'énergie (1), (2) et (3). Compte tenu des simplifications citées ci-dessus, les variations de densités de population des différents niveaux sont données par les relations suivantes :

$$\frac{dN1}{dt} = -W_{p13}N1 - W_{s12}N1 + W_{s21}N2 + A_{21}^RN2 \quad (3.02)$$

$$\frac{dN2}{dt} = W_{s12}N1 - W_{s21}N2 - A_{21}^RN2 + A_{32}^RN3 \quad (3.03)$$

$$\frac{dN3}{dt} = W_{p13}N1 - A_{32}^RN3 \quad (3.04)$$

Soit ρ_{er} la densité volumique d'ions erbium contenue dans l'amplificateur. C'est la somme des densités volumiques de population des niveaux d'énergie peuplés, c'est-à-dire les niveaux (1), (2) et (3) :

La durée de vie des ions erbium sur le niveau 3 étant très faible, Nous pouvons négliger la valeur de $N3$ dans l'expression ci-dessus. [3.07]

$$\rho_{er} = N_1 + N_2 + N_3 \quad (3.05)$$

3.4.2 Equations d'évolution longitudinale de puissance

Définition 3.09 :

L'intensité lumineuse I d'une source ponctuelle dans une direction donnée est la limite que prend le rapport du flux lumineux élémentaire $d\Omega$ à l'angle solide élémentaire :

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega} \quad (3.06)$$

Les valeurs des puissances lumineuses aux longueurs d'onde de pompe et de signal dépendent de la position longitudinale dans la fibre. Leurs variations locales sont liées au type de pompage utilisé et aux densités volumiques d'ions erbium sur les différents niveaux à l'endroit considéré. Dans le cas d'un pompage à 980nm, comme A_{31}^R est très petit, on néglige la réémission du niveau (3) vers le niveau (1). L'évolution spatio-temporelle de la pompe est déduite de l'équation :

$$\frac{dP_p(r, t, z)}{dz} = -N_1(r, t, z)\sigma_a(\lambda_p)P_p(r, t, z) \quad (3.07)$$

La durée de vie des ions erbium sur le niveau 3 étant très faible, on peut négliger la valeur de N_3 dans l'expression ci-dessus. [3.07]

3.4.3 Equations d'évolution longitudinale de puissance

Définition 3.10 :

Le *photon* est le quantum d'énergie associé aux ondes électromagnétiques (allant des ondes radio aux rayons gamma en passant par la lumière visible), qui présente certaines caractéristiques de particule élémentaire. La lumière monochromatique de fréquence est constituée de photons d'énergie E dépendant uniquement de ν :

$$E = \hbar\omega = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (3.08)$$

Et de quantité de mouvement p :

$$p = \hbar k \quad (3.09)$$

Les valeurs des puissances lumineuses aux longueurs d'onde de pompe et de signal dépendent de la position longitudinale dans la fibre. Leurs variations locales sont liées au type de pompage utilisé et aux densités volumiques d'ions erbium sur les différents niveaux à l'endroit considéré. Dans le cas d'un pompage à 980nm, comme A_{31}^R est très petit, on néglige la réémission du niveau (3) vers le niveau (1). L'évolution spatio-temporelle de la pompe est déduite de l'équation. [3.07]

$$\frac{dP_p(r, t, z)}{dz} = -N_1(r, t, z)\sigma_a(\lambda_p)P_p(t, t, z) \quad (3.10)$$

Où

- r : est la distance entre la position considérée sur la section droite et l'axe de la fibre.

Définition 3.11

L'ASE ou bruit démission spontanée amplifiée est le bruit dans un amplificateur optique qui est dû à l'émission spontanée amplifiée, provoqué par l'onde pompe. C'est un bruit de fond optique qui se propage dans les deux sens. Il s'exprime par sa densité spectrale en sortie de l'amplificateur :

$$N_{ase} = 2N_{sp}(G - 1)hv \quad (3.11)$$

Avec :

N_{sp} : Facteur d'inversion de population

$$N_{sp} = \frac{N_2\sigma_e}{N_2\sigma_e - N_1\sigma_a} \quad (3.12)$$

Nous allons déterminer la valeur de la puissance de pompe à un instant t donné et dans une section droite située à une position z fixée, c'est-à-dire la valeur moyenne de cette puissance $P_p(t, z)$ sur toute la section transverse de la fibre. [3.08]

Il est alors nécessaire de calculer l'intégrale de l'équation suivant toute cette section transverse. Pour cela, définissons préalablement la répartition transverse normalisée de la pompe $I_p(r)$ de la manière suivante :

$$I_p(r) = \frac{P_p(r, t, z)}{\bar{P}_p(t, z)} \quad (3.13)$$

De même pour la densité de population $N_1(r, t, z)$, nous pouvons calculer la valeur moyenne $\overline{N_1}(t, z)$ sur la section transverse et on définit la répartition transverse normalisée d'ions absorbants $I_n(r)$ par la relation :

$$I_n(r) = \frac{N_1(r, t, z)}{\overline{N_1}(t, z)} \quad (3.14)$$

L'équation d'évolution de la puissance de pompe ne fait apparaître qu'un terme lié à l'absorption des photons de pompe :

$$\int_0^\infty \int_0^{2\pi} \frac{dP_p(r, t, z)}{dz} r dr d\theta = -\sigma_a(\lambda_p) \int_0^\infty \int_0^{2\pi} N_1(t, z) I_n(r) P_p(t, z) I_p(r) r dr d\theta \quad (3.15)$$

Où

$$\Gamma_p = \int_0^\infty \int_0^{2\pi} I_n(r) I_p(r) r dr d\theta \quad (3.16)$$

Γ_p est le facteur de recouvrement. Il traduit le recouvrement entre la région dopée en ions Er^{3+} et la répartition transverse de la puissance de pompe, et on obtient finalement la variation longitudinale de la puissance de pompe :

$$\frac{dP_p(t, z)}{dz} = -\sigma_a(\lambda_p) N_1(t, z) \Gamma_p P_p(t, z) \quad (3.17)$$

Il est également possible d'établir une équation traduisant l'évolution longitudinale de la puissance de signal $P_s(t, z)$ en tenant compte à la fois de l'absorption de cette puissance par les ions à l'état fondamental et de son amplification liée à la désexcitation stimulée des ions à l'état métastable. Cette équation, déterminée en suivant le même raisonnement que celui mené pour le calcul de la puissance de pompe, est la suivante :

$$\frac{dP_s(t, z, \lambda_s)}{dz} = [\sigma_e(\lambda_s)N_2(t, z) - \sigma_a(\lambda_s)N_1(t, z)]\Gamma_s(\lambda_s)P_s(t, z, \lambda_s) \quad (3.18)$$

Enfin, il nous faut également considérer l'évolution de la densité spectrale de bruit générée par l'ASE (Amplified Spontaneous Emission ou bruit d'émission spontanée amplifiée). On notera cette densité $S_{ASE}(\lambda, z)$. [3.09]

L'équation d'évolution longitudinale de la densité spectrale de bruit obéit à une loi en tout point analogue à celle régissant la puissance signal :

$$\frac{dS_{ASE}(t, z, \lambda)}{dz} = [\sigma_e(\lambda)N_2(t, z) - \sigma_a(\lambda)N_1(t, z)]\Gamma_s(\lambda)S_{ASE}(t, z, \lambda) \quad (3.19)$$

La relation précédente est incomplète car elle ne prend pas en compte le bruit généré en une position par l'émission spontanée de photons. Ces photons de bruit sont émis dans des directions quelconques et seuls les photons émis dans le cône d'acceptance de la fibre peuvent être guidés. [3.10]

Comme ces derniers peuvent se propager vers l'amont ou l'aval de la fibre optique, on définit le bruit co-propagatif S_{ASE}^+ pour désigner le bruit se propageant dans le même sens que le signal, et le bruit contra-propagatif S_{ASE}^- pour le bruit se propageant dans le sens contraire. La densité spectrale de bruit totale est obtenue en faisant la somme de ces 2 grandeurs.

$$S_{ASE} = S_{ASE}^+ + S_{ASE}^- \quad (3.20)$$

Pour obtenir une équation d'évolution qui prenne en compte tout le bruit, il faut ajouter aux expressions des densités spectrales de bruit le nombre de photons émis spontanément. En une position z fixée, le nombre de photons émis spontanément est :

$$N_2(z, t)\sigma_e(\lambda)\Gamma_s(\lambda) \quad (3.21)$$

Pour une polarisation donnée. Les photons émis spontanément ont une polarisation aléatoire qui peut être décomposée en deux polarisations orthogonales. Il convient donc de multiplier par 2 le nombre de photons résultant de l'émission spontanée et calculé pour une polarisation donnée. On peut en déduire l'accroissement de la densité spectrale de bruit dû à l'émission spontanée, pour des valeurs de z et λ fixées et pour une direction donnée, qui vaut :

$$2h\left(\frac{C}{\lambda}\right)N_2(z, t)\sigma_e(\lambda)\Gamma_s(\lambda) \quad (3.22)$$

L'équation d'évolution de la densité spectrale de bruit donnée par la formule (II.13) doit être complétée de la manière suivante :

$$\frac{dS_{ASE}^{+/-}(\lambda, t, z)}{dz} = \left[+2h\frac{c}{\lambda}\sigma_e(\lambda)N_2(t, z) \pm [N_2(t, z)\sigma_e(\lambda) - N_1(t, z)\sigma_a(\lambda)]S_{ASE}^{+/-}(\lambda, t, z) \right] \Gamma_s(\lambda) \quad (3.23)$$

Les équations sur l'équation d'évolution longitudinale de puissance sont couplées par l'intermédiaire des densités N_1 et N_2 , elles-mêmes reliées entre elles via les différents taux. Il apparaît donc nécessaire de connaître les expressions des différents taux de transitions. Tel est l'objectif de notre paragraphe qui suit.

3.4.4 Taux de transition entre niveaux d'énergie

Définition 3.12 :

Un *niveau d'énergie* est une quantité utilisée pour décrire les systèmes en mécanique quantique et par extension dans la physique en général, sachant que, s'il y a bien quantification de l'énergie, à un niveau d'énergie donné correspond un « état du système » donné ; à moins que le niveau d'énergie soit dit « dégénéré ». [3.09] [3.10]

Les différentes densités volumiques de population étant couplées par l'intermédiaire des taux de transitions, nous allons déterminer les équations régissant les différents taux à partir de celles décrivant l'évolution de ces densités volumiques. Considérons dans un premier temps l'absorption des photons de pompe par les ions erbium à l'état fondamental N_1 .

La variation du nombre d'ions dans cet état, au cours de la propagation sur un tronçon de longueur Δ_z pendant une durée Δt , est égale à la variation du nombre de photons absorbés.

Sachant que le nombre de photons à la longueur d'onde de pompe est donné par :

$$\frac{P_p(r, z) \cdot \lambda_p}{hc} \quad (3.24)$$

On aboutit à la relation :

$$\Delta N_1(r, z) \Delta_z = \frac{\Delta P_p(r, z) \lambda_p}{hc} \Delta_t \quad (3.25)$$

En utilisant la relation de l'équation d'évolution longitudinale de puissance, Nous pouvons écrire la forme différentielle de la façon suivante :

$$\frac{dN_1(r, z)}{dt} = \frac{dP_p(r, z)}{dz} \frac{\lambda_p}{hc} = -\sigma_a(\lambda_p) \frac{P_p(r, z) \lambda_p}{hc} N_1(r, z) \quad (3.26)$$

En intégrant la relation précédente sur toute la section transverse de la fibre et avec la définition du facteur de recouvrement Γ_p donnée au paragraphe 3.4.3, on aboutit à une expression différentielle de la variation de la densité volumique de population du niveau fondamental en fonction du temps :

$$\frac{dN_1(z)}{dt} = -\sigma_a(\lambda_p) \frac{P_p(z) \lambda_p}{hc} \Gamma_p N_1(z) \quad (3.27)$$

Si nous ne considérons que l'évolution de N_1 due à l'absorption de la pompe, nous pouvons écrire l'équation comme suit :

$$\frac{dN_1(z)}{dt} = -W_{p13} N_1(z) \quad (3.28)$$

En faisant l'analogie entre les équations l'équation d'évolution longitudinale de puissance et l'absorption de la pompe si on ne considère que N_1 , on peut alors déterminer l'expression du taux d'absorption de la pompe par les ions à l'état fondamental :

$$W_{p13}(z) = \frac{P_p(z) \lambda_p}{hc} \sigma_a(\lambda_p) \Gamma_p \quad (3.29)$$

Comme le taux d'émission spontanée à $\lambda_p = 980\text{nm}$ est négligeable, l'expression de W_{p13} ne tient pas compte d'éventuels photons de bruit émis à cette longueur d'onde. [3.09] [3.10] On peut de la même manière obtenir les taux d'absorption et d'émission du signal. Cette fois ci, il faut tenir compte des photons émis spontanément à λ_s . Dans le terme traduisant leur existence (second terme des équations, la puissance du signal est remplacée par l'intégrale sur

tout le spectre de la densité de puissance de bruit car le bruit est émis sur une très large bande spectrale.

$$W_{s12}(z) = \left[\frac{P_s(z)}{h\nu_s} \sigma_a(\nu_s) + \int_0^{\infty} \frac{S_{ASE}(\nu, z)}{h\nu} \sigma_a(\nu) d\nu \right] \Gamma_s(\nu_s) \quad (3.30)$$

$$W_{s21}(z) = \left[\frac{P_s(z)}{h\nu} \sigma_e(\nu_s) + \int_0^{\infty} \frac{S_{ASE}(\nu, z)}{h\nu} \sigma_e(\nu) d\nu \right] \Gamma_s(\nu_s) \quad (3.31)$$

Où :

$$\nu = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (3.32)$$

Nous avons établi dans ce paragraphe les expressions des puissances de signal, de pompe et de densité spectrale. Ces résultats vont nous permettre maintenant de déterminer les grandeurs caractéristiques de l'amplificateur telles que le gain où la puissance de saturation. [3.09] [3.10]

3.5 Paramètres d'une fibre dopée erbium

Dans cette partie nous introduisons certains paramètres caractérisant une fibre dopée aux ions erbium. [3.10]

3.5.1 Facteur de recouvrement Γ

Définition 3.13

La *concentration* désigne la proportion d'un soluté dans la matière ; on distingue :

- Concentration massique, rapport d'une masse par rapport à un volume, exprimée en g/L ;
- Concentration molaire, rapport d'une quantité de matière par rapport à un volume, exprimée en mol/L ;

Lors de la phase de dopage, une certaine concentration d'ions erbium est incorporée dans le cœur de la fibre. Cependant cette concentration en ions n'occupe pas forcément toute la surface du cœur. [3.10]

Nous définissons donc le recouvrement comme étant la partie du profil d'intensité qui interagit avec la zone dopée.

$$\Gamma \alpha \iint_{\infty} r dr d\theta. I(r). D(r) \quad (3.33)$$

Avec $I(r)$: L'intensité du mode.

$D(r)$: La distribution des dopants dans le cœur.

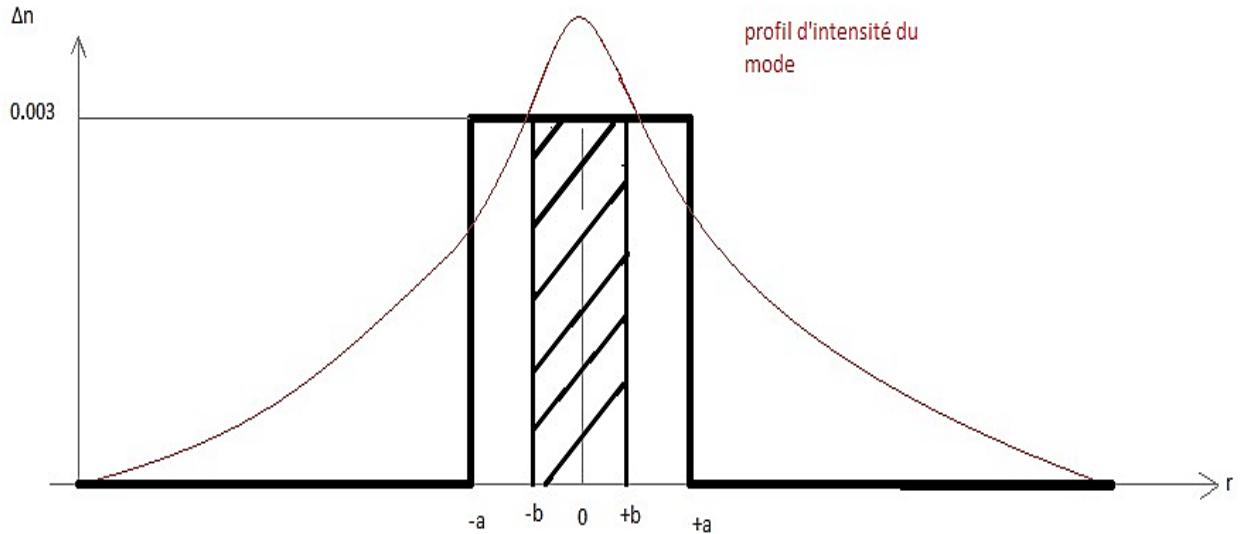


Figure 3.07: Représentation du profil d'intensité du mode en fonction de r

Nous avons représenté en abscisse le rayon et en ordonnée la différence d'indice entre la gaine et le cœur. La zone dopée est la partie hachurée. [3.10]

Le facteur de recouvrement est une grandeur sans dimension, qui est compris entre 0 et 1 et qui a pour expression numérique :

$$\Gamma = 1 - \exp(-2 \cdot \frac{b^2}{\omega^2}) \quad (3.33)$$

Avec $\omega(r)$: Le rayon du mode

b : Le rayon de la zone dopée

3.5.2 Durée de vie τ

Le temps de vie d'un électron dans un niveau d'énergie correspond à la durée durant laquelle l'électron est présent dans ce niveau avant qu'il se désexcite vers son niveau fondamental.

La durée de vie est une grandeur importante car elle permet de réaliser l'inversion de population, elle est de l'ordre de 10ms. [3.10]

3.5.3 Gain G

Par définition, le gain G d'un amplificateur est un coefficient de proportionnalité entre la puissance d'entrée d'un signal (P_e) et sa puissance en sortie (P_s). Il s'exprime en décibel (dB) et a pour expression :

$$G = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{P_e}{P_s} \right) \quad (3.34)$$

Il traduit donc l'augmentation du signal si $G > 0$. [3.10]

G est déterminé en intégrant le gain linéaire g sur toute la longueur de la fibre. Si z représente l'axe de propagation du signal et L la longueur de la fibre dopée, G s'écrit alors :

$$G = \int_0^L g \cdot dz \quad (3.35)$$

Avec :

$$g = N_t \cdot (n_2 \cdot \sigma_e - n_1 \cdot \sigma_a) \Gamma \quad (3.36)$$

Où σ_a : section efficace d'absorption

σ_e : section efficace d'émission

3.5.4 Puissance de saturation de la pompe

La saturation représente le niveau de sortie du signal optique dans le cas où nous ne pouvons plus l'augmenter, même si le niveau d'entrée augmente. [3.10]

La puissance de saturation de la pompe est définie comme la puissance pour laquelle la population du niveau 2 soit égale à la population du niveau fondamental pour une longueur d'onde et une distance z données.

À cette puissance le milieu est dit transparent, il y a autant de probabilité d'avoir un photon émis qu'absorbé pour une longueur d'onde telle que la section efficace d'absorption égale à la section efficace d'émission c'est à dire vers 1530 nm. [3.10]

La puissance de saturation est une grandeur qui nous permettra de déterminer la section efficace d'absorption de la pompe. En effet elle s'exprime de la façon suivante :

$$P^{sat} = \frac{h \cdot \nu_p \cdot S}{h \cdot \nu_p \cdot S} \quad (3.37)$$

Avec :

S : Aire de la zone dopée

v_p : Fréquence de la pompe

P^{sat} : Puissance de saturation

3.6 Milieu de gain de l’Erbium

Au cours de ce paragraphe, nous allons décrire de façon succincte plusieurs propriétés de l’erbium. Le but étant d’avoir une vision d’ensemble des caractéristiques de l’erbium lorsqu’il est utilisé comme milieu de gain. Tout au long de ce mémoire, les caractéristiques de l’erbium seront approfondies au travers de l’étude des différents régimes d’émission de notre laser multi-longueurs d’ondes. [3.10]

3.6.1 Élargissement spectral de la transition

L’élargissement spectral des transitions énergétiques est le résultat de la combinaison de plusieurs effets. Dans de nombreux matériaux amplificateurs comme l’erbium, les niveaux supérieur et inférieur du diagramme énergétique se décomposent en plusieurs sous-niveaux. Nous affirmons alors de bandes énergétiques. À l’origine de ces subdivisions on retrouve l’effet Stark qui traduit l’interaction du champ de la matrice de verre sur les dopants et donc l’annulation de la dégénérescence des niveaux énergétiques. [3.10] [3.11]

Nous retrouvons principalement deux contributions liées à l’élargissement spectral des transitions énergétiques : les contributions homogènes et les contributions inhomogènes décrites à la figure 3.08 La contribution inhomogène provient de la structure interne du matériau. En effet, le champ interne de la matrice de verre est différent selon la position considérée et donc l’interaction de ce champ avec les ions varie d’un site à un autre.

La seconde contribution à l’élargissement spectral est une contribution homogène reliée aux effets thermiques et donc aux transitions non radiatives, les phonons. Ces effets thermiques issus des vibrations des atomes au cœur de la matrice de verre induisent des fluctuations du champ interne et par voie de conséquence, un élargissement des niveaux Stark.

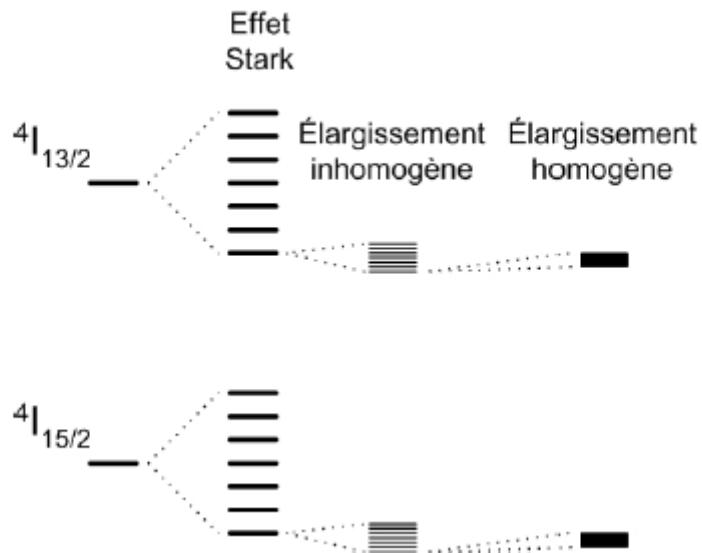


Figure 3.08 : Schéma énergétique décrivant en détails la structure de l'ion Er^{3+}

La conséquence majeure de l'élargissement d'une transition apparaît dans la saturation du Gain. La figure 3.09 présente la saturation dans le cas de milieux de gain à élargissements homogène et inhomogène. Dans le cas homogène, une longueur d'onde signal donnée interagit de façon équiprobable avec tous les ions du milieu de gain. Le gain sature donc de manière uniforme sur toute la plage d'étude. Dans le cas de l'élargissement inhomogène, une longueur d'onde interagit avec une fraction des ions excités et la saturation du gain se produit sur une bande spectrale limitée autour de la longueur d'onde amplifiée. Dans ce dernier cas, Nous observons un « trou » dans le spectre de gain (spectral hole burning). [3.10] [3.11] [3.14]

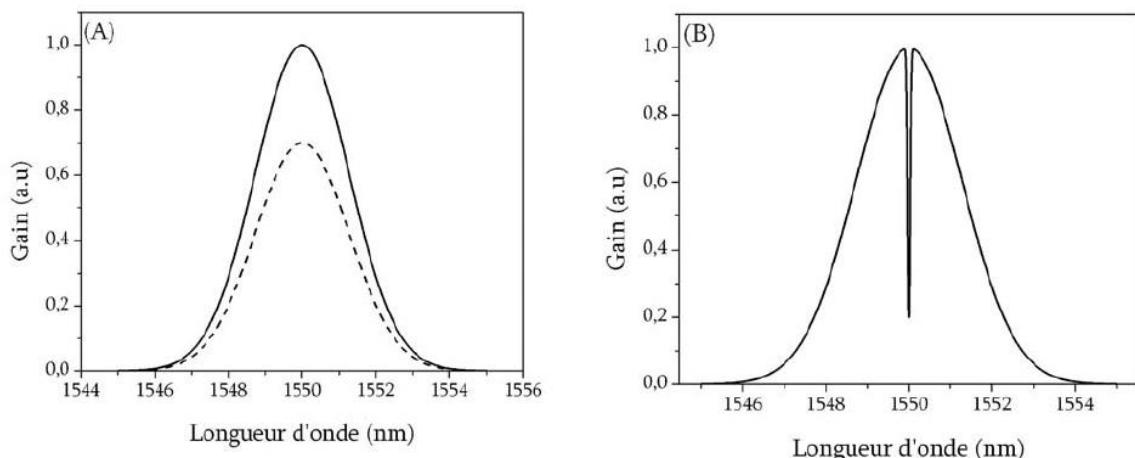


Figure 3.09 : Saturation du gain par un signal fort :
 (A) Saturation dans le cas d'un milieu à élargissement homogène.
 (B) Saturation dans le cas d'un milieu à élargissement inhomogène

Dans le cas de l'erbium, le processus dominant à température ambiante est toujours difficile à déterminer. En pratique, les deux élargissements sont présents dans les fibres dopées à l'erbium. D'une part, l'énergie de phonon et le couplage électron-phonon sont élevés ce qui induit un l'élargissement homogène non-négligeable. D'autre part, l'élargissement inhomogène ne peut pas être négligé du fait du nombre des sites différents occupés par l'erbium dans la matrice de silice. On définit alors l'erbium comme un milieu majoritairement à élargissement homogène à température ambiante. [3.10] [3.11] [3.15]

3.6.2 Systèmes à trois niveaux

Nous avons mentionné au paragraphe 3.2 que plusieurs longueurs d'onde de pompe peuvent être utilisées pour créer l'inversion de population dans l'erbium. Cependant, les valeurs 980 et 1480 nm sont les plus courantes pour le pompage des lasers à fibre dopée à l'erbium car la technologie des diodes laser associée à ces longueurs d'onde permet d'obtenir des sources de haute puissance, fiables et compactes. De plus l'absorption à partir des états excités est réduite. Les transitions énergétiques impliquées sont cependant différentes dans les deux schémas de pompage. Dans le cas d'une longueur d'onde de 980 nm, Nous obtenons un système à trois niveaux, tandis qu'à 1480 nm il s'agit d'un système à deux niveaux seulement.

Dans un système à trois niveaux (figure 3.10), le pompage permet le transfert d'un électron du niveau E_1 à E_3 , puis à l'aide d'une transition non radiative, cet électron peuple le niveau E_2 . La transition radiative s'effectue entre le niveau E_2 et E_1 . Suite à la transition radiative, l'électron est de nouveau disponible pour le pompage. [3.16] [3.18]

Dans un système à trois niveaux, puisque le niveau inférieur de la transition radiative est aussi le niveau fondamental, il peut y avoir absorption du signal par les ions se trouvant dans l'état fondamental. Il est donc nécessaire de pomper un nombre important d'ions dans l'état excité avant d'obtenir du gain. [3.16] [3.18]

Typiquement, une inversion de population de 50 % permettra d'observer du gain sur toute la plage spectrale. En raison de cette propriété physique, les seuils de puissance de pompe nécessaires au fonctionnement d'un système laser à trois niveaux sont relativement élevés.

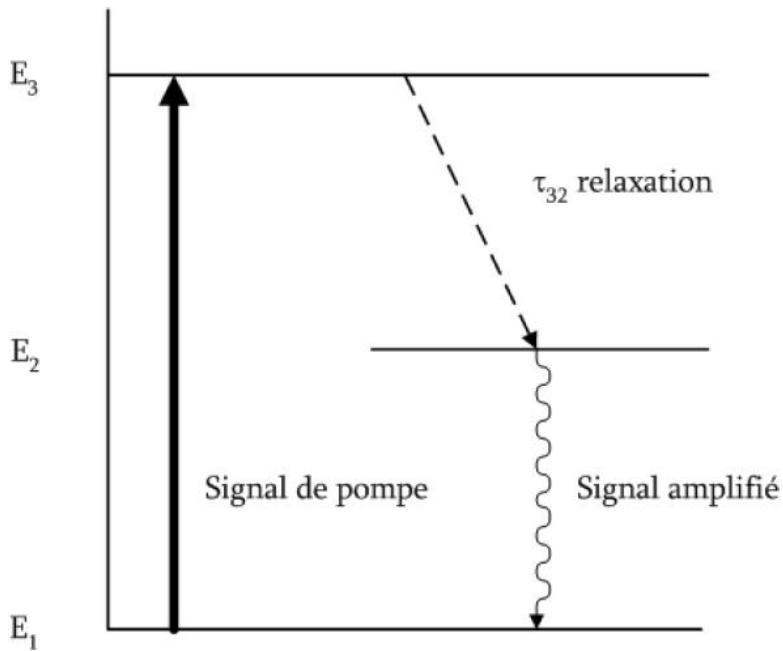


Figure 3.10 : Schématisation d'un système à trois niveaux (Erbium à 1550 nm)

Enfin, mentionnons que si la longueur du milieu de gain est trop importante, dans le cas d'un système à trois niveaux, Nous pouvons observer une absorption du signal par le segment de fibre sur lequel le pompage est insuffisant. [3.16]

Lorsque nous utilisons un pompage à 1480 nm, l'analyse de la figure 2.20 montre que la section efficace d'émission n'est pas nulle pour la longueur d'onde 1480 nm ce qui empêche d'avoir une inversion complète du milieu de gain. Cette propriété fait en sorte de dégrader légèrement la figure de bruit des amplificateurs pompés à 1480 nm comparativement à ceux pompés à 980 nm.

3.6.3 Les sections efficaces d'absorption et d'émission

Si nous considérons une transition entre deux niveaux énergétiques, la probabilité d'absorber ou d'émettre un photon d'énergie $\hbar\omega = E_2 - E_1$ est proportionnelle aux sections efficaces d'absorption et d'émission. [3.17] [3.18]

La transition $^4\text{I}_{13/2} - ^4\text{I}_{15/2}$ de l'erbium s'effectue entre deux bandes d'énergie constituées de plusieurs sous-niveaux. La présence de gain résulte de la différence entre les sections efficaces d'absorption et d'émission de ces bandes. En effet, celles-ci sont la somme des sections efficaces correspondant aux transitions entre les différents niveaux pondérés par la probabilité d'occupation de ces niveaux. Un exemple typique de sections efficaces dans une fibre de silice dopée à l'erbium est présenté à la figure 3.11. Dans de nombreux matériaux amplificateurs, les

sections efficaces d'émission et d'absorption sont égales pour les transitions entre deux niveaux énergétiques donnés. Comme l'illustre la figure 3.11, ce n'est pas le cas pour l'erbium à température ambiante puisque les sections efficaces réfèrent à des transitions entre des bandes de niveaux. En effet, les deux niveaux formant la transition radiative de l'erbium sont constitués de plusieurs sous-niveaux, de fait, la répartition des ions dépendant de la thermalisation est inégale entre les différents sous niveaux. [3.11] [3.18]

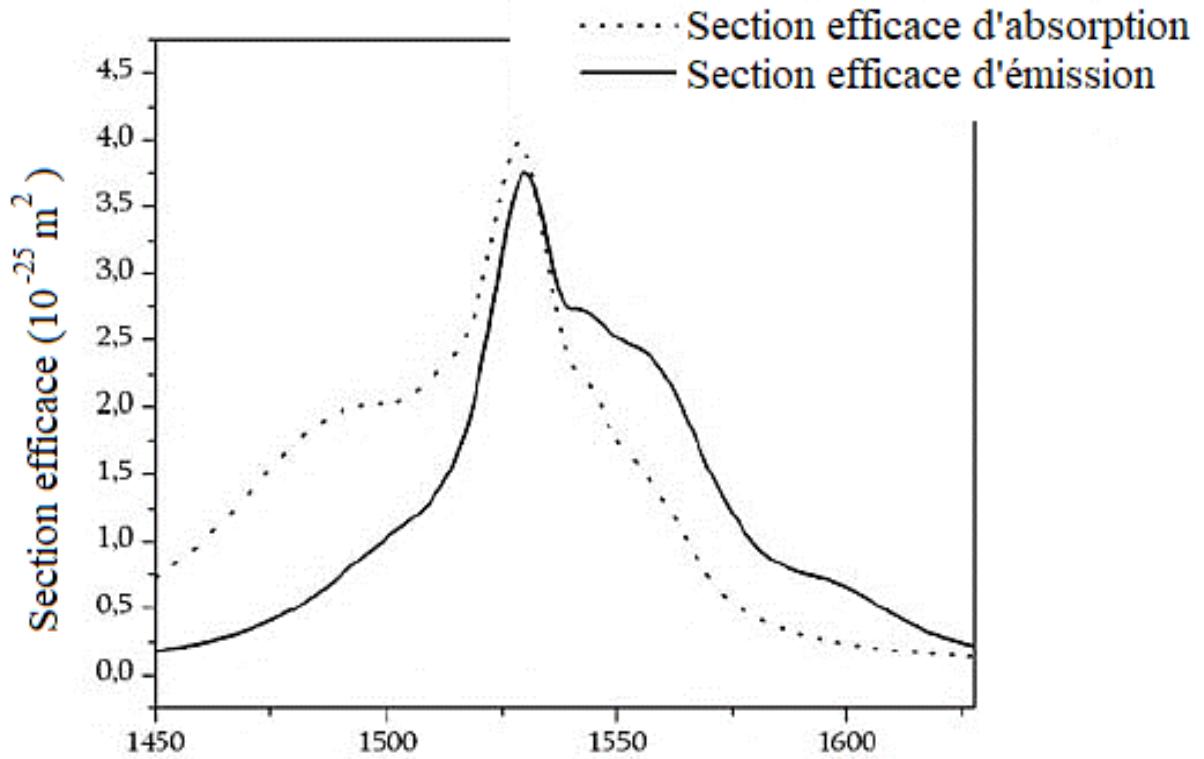


Figure 3.11 : Sections efficaces d'émission et d'absorption de la fibre HP980 de la compagnie Lucent Technologies

3.7 Conclusion

Ce chapitre avait pour objectif d'exposer les mécanismes de l'amplification optique ainsi que d'expliquer le choix des terres rares comme dopants actifs à intégrer dans la matrice hôte de silice pour réaliser cette fonction. Nous avons également présenté les techniques utilisées pour réaliser les préformes des fibres optiques ainsi que les procédés permettant l'incorporation des terres rares dans les cœurs de ces préformes.

CHAPITRE 4 : MODELISATION DE L'EVOLUTION DU GAIN ET EVALUATION DE L'AMPLIFICATEUR DOPEE A L'ERBIUM

Le but du présent mémoire est de définir les équations de performances d'une fibre dopée à l'erbium à travers les notions de bases évoquées dans la partie théorique.

Pour ce faire nous aurons 2 objectifs globaux :

- Le premier objectif aura pour but de rechercher la forme générale de l'équation du gain en fonction des paramètres de bases d'une fibre dopée à l'erbium acquise dans la partie théorique à des fins d'optimisation.
- Le second, quant à lui, consiste à évaluer l'amplificateur dopé à l'erbium pour le cas petit signal pour une déduction de la valeur de saturation.

La mesure précise des sections efficaces de l'erbium est très délicate et les notions de base contiennent de nombreux documents décrivant différentes techniques de mesures. Une connaissance précise de ces paramètres est néanmoins très importante pour la conception de fibre dopée à l'erbium dans la mesure où la forme spectrale du gain dépend directement des sections efficaces d'émission et d'absorption du milieu.

Les démarches que nous avons choisies pour atteindre nos deux objectifs spécifiques sont les suivantes :

- Rechercher l'équation du gain en fonction des paramètres de bases d'une fibre dopée à l'erbium.
- Evaluer et déduire le cas petit signal pour la fibre dopée à l'erbium.
- Comparer la modélisation mathématique et évaluer les résultats à la représentation de l'évolution du gain sur le logiciel Matlab.
- Et enfin déterminer les résultats retrouvés sur le cas petit signal à partir de la représentation sur Matlab.

4.1 Modélisation de l'équation du gain

Le gain en signal de l'amplificateur optique traduit l'augmentation du signal dans la fibre. D'après les études théoriques, le gain au niveau d'une fibre dopée à l'erbium est défini par le rapport entre la sortie et l'entrée.

Comme nous l'avons constaté dans le paragraphe précédent, l'ion erbium peut être décrit par un système à trois niveaux lorsque la longueur d'onde de 980 nm est utilisée. Cependant, afin de simplifier la modélisation, il est possible de le réduire à un système à deux niveaux. En effet, la transition non radiative entre le niveau supérieur $^4I_{11/2}$ et le niveau $^4I_{13/2}$ est suffisamment

rapide pour considérer que le niveau supérieur soit vide. Cette approximation est donc pleinement fondée pour les longueurs d'onde de pompe 980 et 1480 nm.

Ainsi les équations d'évolution des populations d'un système à deux niveaux sont le point de départ de la modélisation d'un amplificateur optique à fibre dopée erbium, et s'expriment de la manière suivante [4.01] [4.02] [4.03] :

$$\begin{cases} \frac{dN_2}{dt} = (\sigma_s^a N_1 - \sigma_s^e N_2) \frac{P_s}{h\nu_s A_{eff}} - (N_2 \sigma_p^e - N_1 \sigma_p^a) \frac{P_p}{h\nu_p A_{eff}} + \\ \quad (N_1 \sum_j \frac{\sigma^a(\nu_j) P_{ESA}(\nu_j)}{h\nu_j A_{eff}} - N_2 \sum_j \frac{\sigma^e(\nu_j) P_{ESA}(\nu_j)}{h\nu_j A_{eff}} - \frac{N_2}{\tau}) \\ \frac{dN_1}{dt} = (\sigma_s^e N_2 - \sigma_s^a N_1) \frac{P_s}{h\nu_s A_{eff}} - (N_1 \sigma_p^a - N_2 \sigma_p^e) \frac{P_p}{h\nu_p A_{eff}} + \\ \quad (N_2 \sum_j \frac{\sigma^e(\nu_j) P_{ESA}(\nu_j)}{h\nu_j A_{eff}} - N_1 \sum_j \frac{\sigma^a(\nu_j) P_{ESA}(\nu_j)}{h\nu_j A_{eff}} - \frac{N_1}{\tau}) \end{cases} \quad (4.01)$$

Soit :

- N_2 et N_1 : représentent respectivement population du niveau supérieur et du niveau fondamental de la structure énergétique.
- $\sigma_s^e, \sigma_s^a, \sigma_p^e, \sigma_p^a$: définissent les sections efficaces d'émission et d'absorption pour la longueur d'onde de signal et de pompe et $\sigma^a(\nu_j)$ et $\sigma^e(\nu_j)$.
- Les sections efficaces d'absorption et d'émission pour chaque fréquence composant le signal d'ESA, $P_{ESA}(\nu_j)$. Ce signal est en fait la somme de l'ESA co-propagative, P_{ESA}^+ et de l'ESA contra-propagative, P_{ESA}^- .
- ν_s et ν_p : sont les fréquences du signal et de la pompe, h est la constante de Planck et A_{eff} l'aire effective du mode LP_{01} .

Les équations d'évolution des populations décrivent en fait un bilan des transitions entre les deux bandes d'énergie. En effet, l'absorption du signal de pompe augmente le niveau supérieur tandis que le signal optique entraîne des transitions radiatives vers le niveau fondamental. L'autre phénomène à l'origine du dépeuplement du niveau supérieur est la transition spontanée, caractérisée par la constante de temps de vie τ .

Les simulations numériques d'amplificateurs optiques nécessitent rarement l'étude du régime transitoire. En fait, la plupart des études sont réalisées dans le cas stationnaire. On peut alors facilement obtenir une expression analytique de N_2 et N_1 dans ce cas de figure.

Sachant que la concentration d'erbium N est égale à $N_2 + N_1$, N_2 peut s'exprimer de la manière suivante :

$$N_2 = \frac{\frac{\tau\sigma_s^a}{h\nu_s A_{eff}} P_s + \sum_j \frac{\tau\sigma^a(v_j)}{h\nu_j A_{eff}} P_{ESA}(v_j) + \frac{\tau\sigma_p^a}{h\nu_p A_{eff}} P_p}{\frac{\tau(\sigma_s^a + \sigma_s^e)}{h\nu_s A_{eff}} P_s + \sum_j \frac{\tau(\sigma^a(v_j) + \sigma^e(v_j))}{h\nu_j A_{eff}} P_{ESA}(v_j) + \frac{\tau(\sigma_p^a + \sigma_p^e)}{h\nu_p A_{eff}} P_p} N \quad (4.02)$$

Pour mieux représenter les paramètres mise en œuvre, la figure 4.01 permet de résumer les paramètres influençant l'équation du gain et permet une modélisation d'un amplificateur à fibre optique dopée à l'erbium. L'équation du gain nécessite le calcul de l'évolution de quatre quantités. Tout d'abord la puissance du signal de pompe (P_p) nécessaire afin d'inverser le milieu de gain et la puissance du signal à la longueur d'onde amplifiée (P_s).

Nous devons enfin considérer les puissances des deux signaux d'émission spontanée amplifiée (ESA) co-propagatif et contra-propagatif (P_{ESA}^+ et P_{ESA}^-). Ces deux quantités sont la somme de toutes les puissances de l'ESA aux différentes longueurs d'onde de la bande spectrale d'étude.

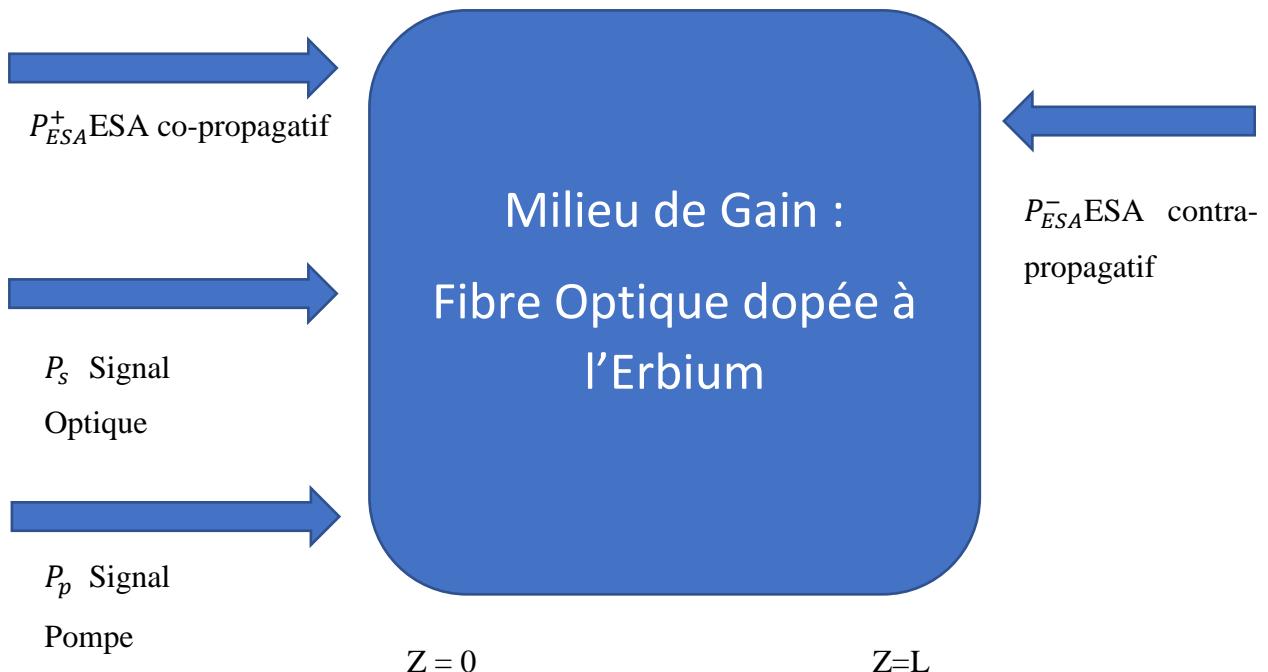


Figure 4.01 : Schématisation des paramètres de l'amplificateur à fibre dopée à l'erbium en fonction de la longueur de la fibre

Afin de quantifier les performances d'un amplificateur, Nous définissons son gain comme étant le rapport entre la puissance de signal en sortie du dispositif P_{sout} et la puissance de signal injectée P_{sin} .

A partir de l'équation traduisant l'évolution longitudinale de la puissance de signal :

$$\frac{dP_s(t, z, \lambda_s)}{dz} = [\sigma_e(\lambda_s)N_2(t, z) - \sigma_a(\lambda_s)N_1(t, z)]\Gamma_s(\lambda_s)P_s(t, z, \lambda_s) \quad (4.03)$$

Nous obtenons alors après la dérivation en fonction de z . Pour la résolution de notre système nous prenons comme condition initiale :

$$P_s(z = 0) = P_{sin} \quad (4.03)$$

En appliquant sur l'évolution longitudinale :

$$\frac{dP_s(t, z, \lambda_s)}{dz} = [\sigma_e(\lambda_s)N_2(t, z) - \sigma_a(\lambda_s)N_1(t, z)]\Gamma_s(\lambda_s)P_s(t, z, \lambda_s) \quad (4.04)$$

Nous déterminons alors l'expression de la puissance du signal en sortie d'une fibre amplificatrice de longueur L tel que :

$$P_{sout}(\lambda_s) = P_{sin}(\lambda_s) \exp \left\{ \int_0^L (\sigma_e(\lambda_s)N_2(z) - \sigma_a(\lambda_s)N_1(z))\Gamma_s(\lambda_s)dz \right\} \quad (4.05)$$

Soit le gain se définit par :

$$G = \frac{P_{sout}}{P_{sin}}$$

D'après l'expression de la puissance du signal de sortie on peut déduire le rapport entre P_{sout} et P_{sin} pour la déduction du gain.

$$\frac{P_{sout}(\lambda_s)}{P_{sin}(\lambda_s)} = \exp \left\{ \int_0^L (\sigma_e(\lambda_s)N_2(z) - \sigma_a(\lambda_s)N_1(z))\Gamma_s(\lambda_s)dz \right\} \quad (4.06)$$

Nous en déduisons alors l'expression de l'équation du gain :

$$G(\lambda_s) = \exp \left\{ \Gamma_s(\lambda_s) \int_0^L [\sigma_e(\lambda_s)N_2(z) - \sigma_a(\lambda_s)N_1(z)]dz \right\} \quad (4.07)$$

4.2 Interprétation de l'équation du gain

Dans le cas de notre fibre amplificatrice dopée à l'erbium, si un photon est émis dans le mode de propagation de la fibre, il peut se propager vers la sortie mais aussi vers l'entrée de la fibre. Il est donc amplifié en provoquant la désexcitation d'ions à l'état métastable. Il y a donc multiplication du photon généré de manière spontanée.

Cette expression suscite plusieurs commentaires et de paramètres mise en œuvre. Les paramètres qui interagissent dans l'équation sont les suivantes :

- Tout d'abord, pour une longueur fixe de fibre amplificatrice, l'équation confirme que plus le niveau fondamental est dépeuplé au profit du niveau métastable (N_2 proche de ρ_{er} et N_1 proche de 0, c'est-à-dire forte inversion de population), plus grand est le gain. Cette condition peut être obtenue en disposant d'une puissance de pompe élevée et d'un bon recouvrement du champ de faisceau de pompe avec la région dopée.
- Un deuxième point important est que le gain obtenu avec une fibre optique dopée à l'erbium semble d'autant meilleur que le facteur de recouvrement à la longueur d'onde du signal (λ_s) est élevé. Il faut cependant noter que les densités de population N_1 et N_2 dépendent elles aussi du recouvrement respectivement aux longueurs d'onde de pompe et de signal.
- Le gain est étroitement lié à Γ_p et Γ_s mais l'influence de ces paramètres n'est pas explicitement donnée par l'équation du gain :

$$G(\lambda_s) = \exp \left\{ \Gamma_s(\lambda_s) \int_0^L [\sigma_e(\lambda_s)N_2(z) - \sigma_a(\lambda_s)N_1(z)]dz \right\} \quad (4.08)$$

Les paramètres influence sur l'évolution du gain peuvent donc être résumés par le tableau suivant :

Paramètres	Valeurs	Evolution du gain	Interprétations
N_2 et N_1	$N_2 \approx \rho_{er}$ et $N_1 \approx 0$	Gain élevé	Une puissance de pompe élevée et un bon recouvrement du champ de faisceau de pompe
(λ_s)	(λ_s) élevé	Gain élevé	Plus nous avons une longueur d'onde (λ_s) élevée, plus nous avons un signal de sortie élevé
Γ_p et Γ_s	Γ_p et Γ_s élevé	Gain élevé	Le gain dépend Γ_p facteur de recouvrement et Γ_s facteur de recouvrement aux longueurs d'onde du signal

Tableau 4.01 : Variation du gain en fonction des paramètres

4.3 Etude du cas du régime petit signal

Nous nous attacherons par la suite à évaluer l'influence du recouvrement sur le gain de l'amplificateur à l'erbium que nous étudierons.

En régime petit signal, le gain est donc défini par :

$$G = \frac{P_{sout}}{P_{sin}} \approx \text{Constante} \quad (4.09)$$

À travers cette formule nous obtenons les résultats sur le tableau suivants pour les cas des puissances de pompes ayant une même longueur d'onde suivantes avec $\lambda=1550$ nm :

P_p	G ou $\frac{P_{sout}}{P_{sin}}$
50 mW	
60 mW	
70 mW	
80 mW	$G \approx G_0$
90 mW	
100 mW	
110 mW	
120 mW	

Tableau 4.02 : Evolution du gain en fonction de la fonction de pompe P_p

Le gain est quasiment constant et P_{sout} est proportionnelle à P_{sin} quel que soit la variation de la valeur de P_p . Le phénomène d'amplification étant basé sur un transfert d'énergie, la puissance maximale que nous obtenons en sortie de la fibre dopée dépend de la longueur de la fibre et ne peut excéder :

$$P_{max} \approx P_{sin} + \frac{\lambda_s}{\lambda_p} P_p \quad (4.10)$$

Nous pouvons vérifier ce résultat en prenons comme valeur de $\lambda = 1525$ nm et une variation de la longueur de la fibre :

Longueur de la fibre	G_{max}
5 m	≈ 20 dB
7.5 m	≈ 30 dB
10 m	≈ 40 dB
12.5 m	≈ 60 dB

Tableau 4.03 : Evolution du gain en fonction de la longueur de la fibre

4.3.1 Interprétation de l'évolution du gain

Lorsque la puissance d'entrée du signal à amplifier augmente, la puissance du signal en sortie tend vers une valeur maximale limite : il s'agit de la puissance maximale extractible de

l'amplificateur P_{ext} . Nous définissons d'autre part la puissance de saturation P_{sat} comme étant la puissance de signal en entrée pour laquelle le gain obtenu est égal à la moitié du gain petit signal G_0 .

Les amplificateurs à fibre dopée à l'erbium fonctionnant en régime saturé afin d'obtenir une puissance de signal maximale en sortie de fibre sont qualifiés d'amplificateurs de puissance. La puissance « signal » en sortie de l'amplificateur peut être évaluée par la relation simplifiée :

$$P_{sout} = G_0 P_{sin} \frac{P_{sat}}{P_{sat} + P_{sin}} \quad (4.11)$$

Pour de faibles valeurs de P_{sin} nous avons :

$$P_{sin} \ll P_{sat} \quad (4.12)$$

L'évolution de la puissance de sortie est bien quasi-linéaire. A partir de la relation précédente, l'expression du gain de l'amplificateur est donnée par :

$$G = \frac{P_{sout}}{P_{sin}} = \frac{G_0}{1 + \frac{P_{sin}}{P_{sat}}} \quad (4.13)$$

Si nous modélisons cette équation par des valeurs numériques nous obtenons les résultats suivants pour $\lambda=1450$ nm, $\lambda=1550$ nm, $\lambda=1650$ nm :

P_p	λ	$\lambda=1450$ nm	$\lambda=1550$ nm	$\lambda=1650$ nm
50mW				
60mW				
70mW				
80mW				
90mW				
100mW				
110mW				
120mW				

$G \approx 2$ dB

Tableau 4.04 : Résultats du gain de la puissance de pompe en fonction de λ et P_p

4.3.2 Résultat de l'évolution du gain en régime petit signal

Le gain en signal de l'amplificateur optique traduit l'augmentation du signal dans la fibre. En régime petit signal, le gain est proche de la valeur maximale G_0 et lorsque P_{sin} est égale à la puissance de saturation, le gain est égal à $\frac{G_0}{2}$ de la saturation de la puissance de sortie (figure 4.01)

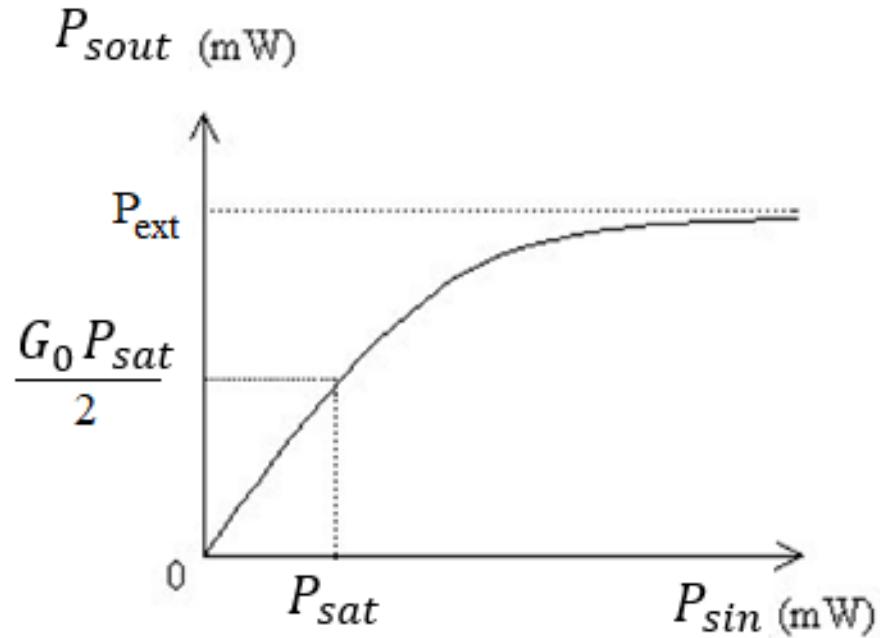


Figure 4.01 : Résultat de la saturation de la puissance de sortie

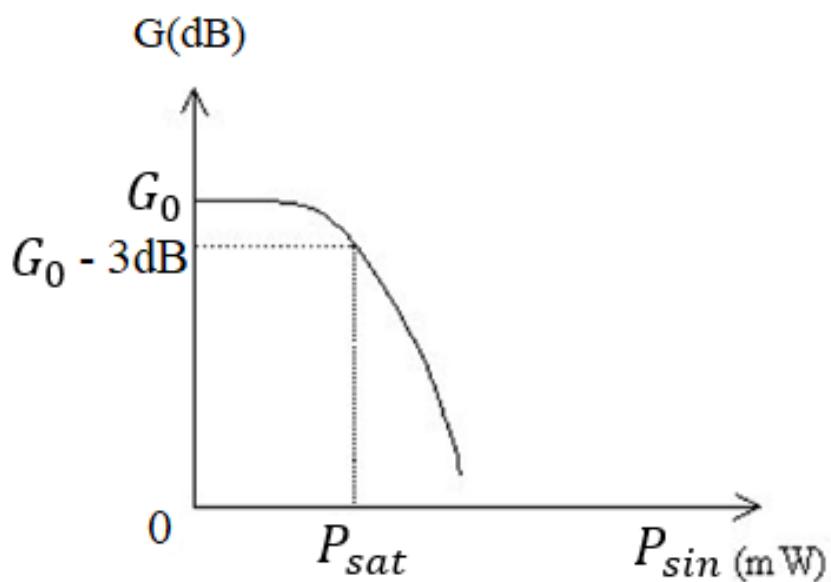


Figure 4.02 : Evolution du gain en fonction de la puissance d'entrée du signal

4.4 Longueur optimale pour l'optimisation

Plaçons-nous à présent dans le cas où tous les paramètres de l'amplificateur sont fixés à l'exception de la longueur de fibre. Si on trace l'évolution de la puissance du signal en sortie de la fibre amplificatrice en fonction de la longueur, on remarque qu'il existe une valeur optimale L_{opt} de la longueur pour laquelle P_{sout} est maximale (figure 4.03).

Au-delà de cette longueur, la puissance de pompe ne permet plus de réaliser l'inversion de population nécessaire à l'amplification du signal. Les ions à l'état fondamental absorbent alors les photons « signal » d'où une diminution de la puissance du signal en sortie de fibre.

- Généralement, les longueurs optimales des fibres amplificatrices sont de l'ordre de quelques mètres à quelques dizaines de mètres suivant les caractéristiques essentielles (structures, dopages, etc.) des éléments constitutifs de l'amplificateur.

Pour retrouver la valeur de L_{opt} il faut chercher la puissance de sortie maximum P_{sout} . La valeur de L_{opt} est retrouvé pour les deux critères suivantes satisfaites.

$$L_{opt} = \begin{cases} P_{sout \ max} \\ N_2 \approx \rho_{er} \text{ et } N_1 \approx 0 \end{cases} \quad (4.13)$$

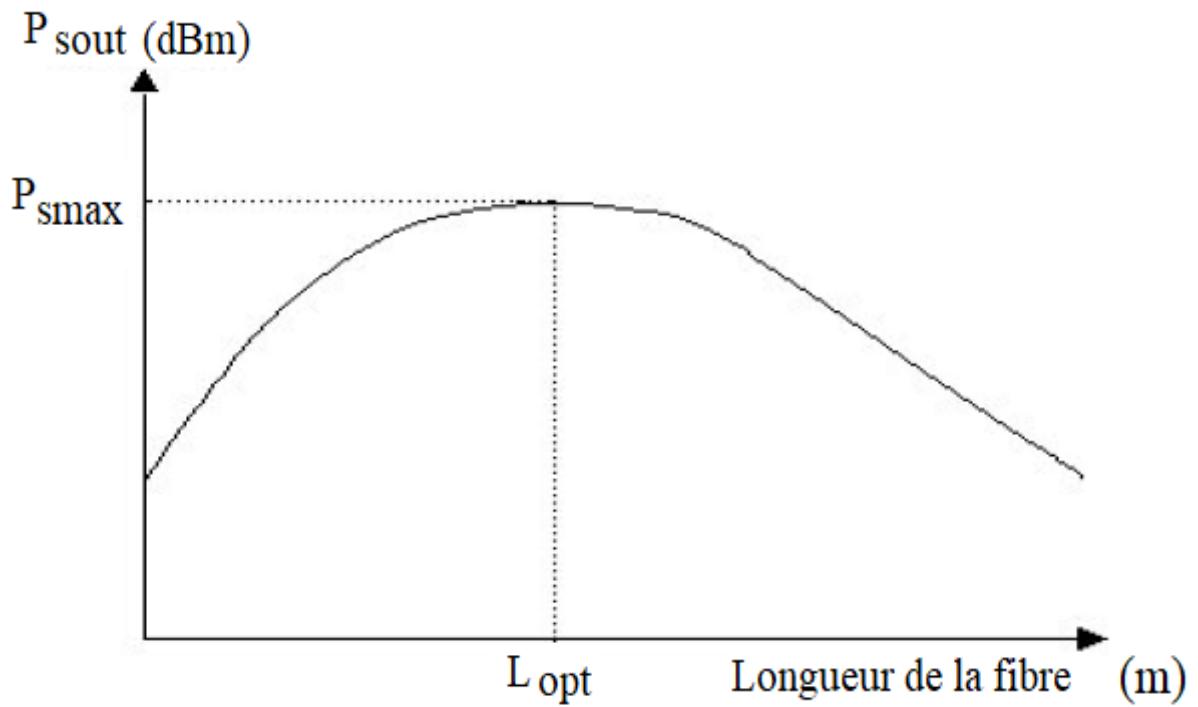


Figure 4.03 : Evolution de la puissance de signal de sortie en fonction de la longueur de la fibre amplificatrice

4.5 Efficacité de conversion quantique et efficacité de conversion de la puissance de pompe

En intégrant l'efficacité quantique obtenue sur tout le spectre du rayonnement lumineux, on peut évaluer le courant produit par un capteur. Le rapport entre ce courant et le courant théorique maximal (QE égal à 100 % sur tout le spectre) s'appelle le rendement électrique. Efficacité de conversion quantique.

- Efficacité de conversion de la puissance de pompe.

Les amplificateurs optiques, et notamment les amplificateurs de puissance, peuvent être caractérisés par une grandeur que l'on appelle efficacité de conversion de puissance (ECP ou en anglais PCE pour « power conversion efficiency ») définie par la relation :

$$ECP = \frac{P_{sout} - P_{sin}}{P_p} \quad (4.14)$$

La valeur maximale de l'efficacité de conversion de puissance est donnée par le rapport :

$$ECP_{max} = \frac{\lambda_p}{\lambda_s} \quad (4.15)$$

Nous introduisons également un autre paramètre appelé efficacité de conversion quantique (ECQ ou QCE pour l'anglais « Quantum Conversion Efficiency ») qui indique la fraction de photons de pompe qui ont été convertis en photons signal. L'expression de l'efficacité de conversion quantique, liée à l'efficacité de conversion de puissance, est donnée par relation :

$$ECQ = \frac{\lambda_s}{\lambda_p} \frac{P_{sout} - P_{sin}}{P_p} = \frac{\lambda_s}{\lambda_p} ECP \quad (4.16)$$

D'après la formule on obtient les résultats de l'ECQ suivant pour $\lambda = 1525 \text{ nm}$:

Gain (dB)	ECQ (%)
0	0
10	25
20	50
30	75
34,5	100

Tableau 4.05 : Résultats du gain en fonction de l'ECQ pour $\lambda = 1525 \text{ nm}$

Nous cherchons à obtenir de fortes valeurs d'efficacité de conversion de puissance surtout lors de la conception d'amplificateurs de puissance.

Sur la figure 4.04 ont été représentées les évolutions du gain et de l'efficacité de conversion de puissance en fonction de la puissance du signal d'entrée. Nous notons que de fortes valeurs de l'efficacité de conversion de puissance (# 90%) peuvent être obtenues pour des puissances d'entrée de l'ordre de -25dBm à 0dBm.

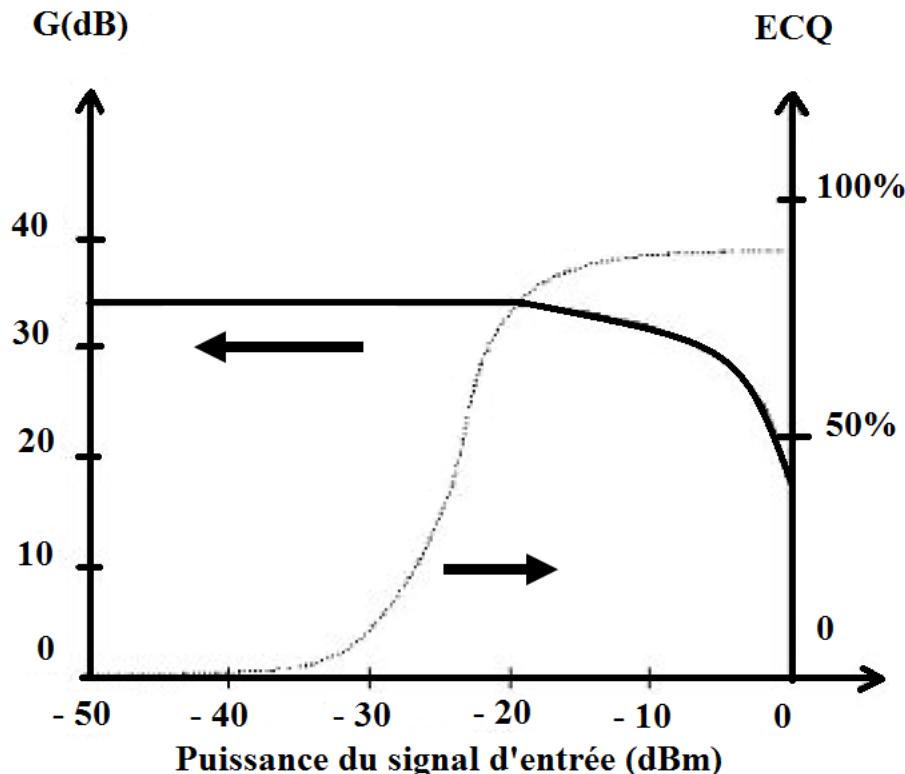


Figure 4.04 : Evolution du gain et de l'efficacité de conversion quantique en fonction de la Puissance du signal d'entrée dans le cas d'un amplificateur optique

4.6 Comparaison de la modélisation mathématique à la représentation de l'évolution du gain sur le logiciel Matlab

Dans la modélisation mathématique, nous avons pu déduire l'équation général du gain et de son évolution en fonction des paramètres de bases. Dans ce paragraphe nous allons comparer la modélisation mathématique avec les résultats obtenus sur Matlab.

Pour notre simulation nous avons utilisé les paramètres d'entrées suivants :

4.6.1 Etude du 1^{er} Cas où $P_p=100$ mW et $\lambda = 980$ nm

4.6.1.1 Paramètres de l'amplificateur

- P_p : 100 mW et 960 nm
- P_{ASE}^+ : 0.2 mW
- P_{ASE}^- : 0.2 mW
- $N_2 \neq \rho_{er}$ et $N_1 \approx 0$

Et nous obtenons :

- P_s
- *Proportion d'excitation*

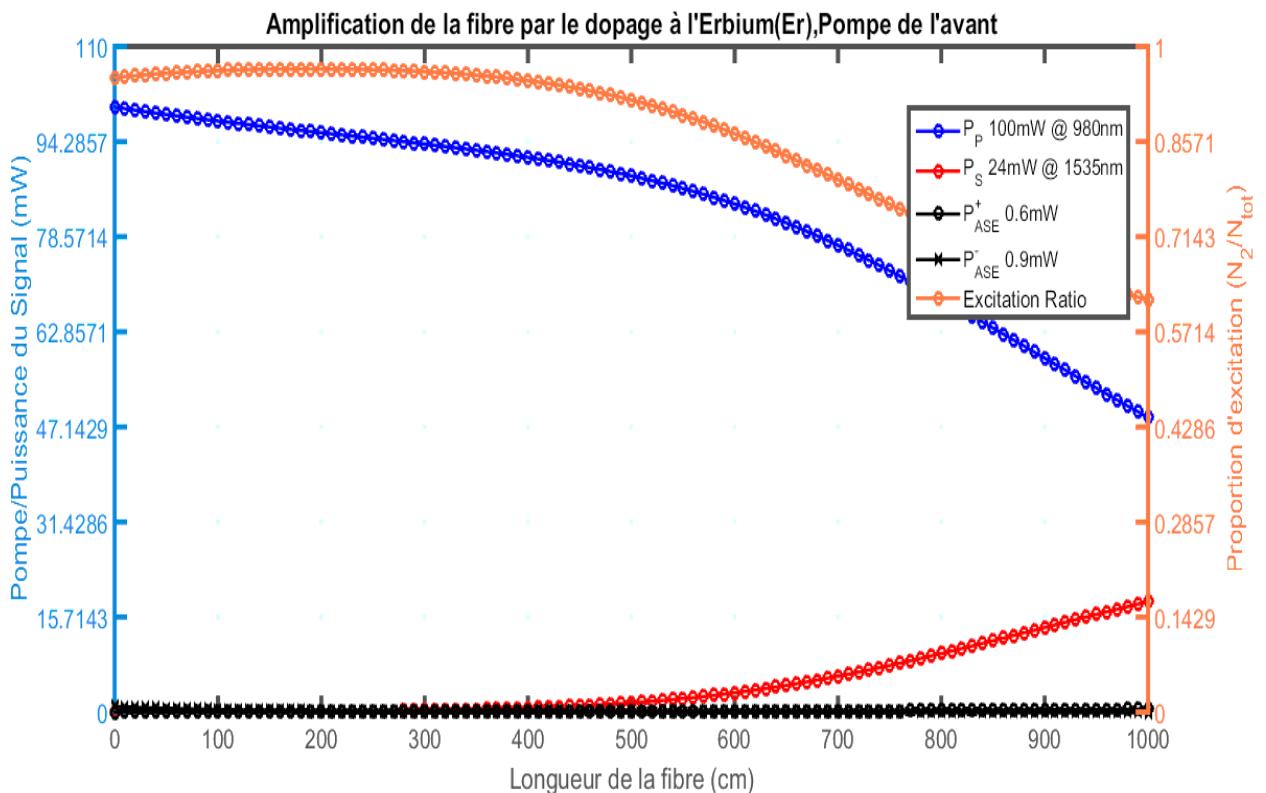


Figure 4.05 : Performance de l'amplificateur pour $P_p=100$ mW et $\lambda=980$ nm

4.6.1.2 Interprétations de la performance de l'amplificateur

La performance de l'amplificateur pour $P_p=100$ mW et $\lambda=980$ nm sur la figure nous permet d'évaluer 5 courbes :

- La courbe bleue représente la puissance de pompe.
- La courbe rouge représente la puissance de sortie.

- Les deux courbes noires représentent P_{ASE}^+ et P_{ASE}^- .
- La courbe orange représente le taux d'excitation

Sur cette courbe nous avons l'évolution de la puissance de pompe, cette puissance diminue en fonction de la longueur de la fibre, cette diminution nécessite un dopage uniforme à chaque longueur de la fibre pour permettre à la fibre une puissance de pompe constante et continue sur toute la fibre optique.

L'évolution de la courbe rouge qui est la base de notre étude. Sur cette figure nous pouvons observer l'augmentation de la puissance de sortie en fonction de la puissance de pompe. Plus la puissance de sortie est élevée plus le gain est élevé. En effet nous l'avons précisé précédemment le gain est le rapport entre la sortie et l'entrée. Ici pour une puissance de sortie de 16mw, $P_s = 16\text{mw}$ il nous faut une puissance de pompe 96mw, $P_p = 96\text{mw}$.

Le bruit d'émission spontanée amplifiée P_{ASE}^+ et P_{ASE}^- est ici négligeable comparé au niveau du signal et de la puissance de pompe.

La mise en évidence de la nécessité d'une puissance de pompe très supérieur est ici observable. Comme nous l'avons démontré précédemment dans les paramètres de l'équation du gain N_1, N_2 et λ_s sont les facteurs clés d'une bonne amplification. Nous allons voir dans le cas suivant une optimisation de ces paramètres.

4.6.2 Etude du 2^{ème} Cas où $P_p=250\text{ mW}$ et $\lambda = 1064\text{nm}$

4.6.2.1 Paramètres de l'amplificateur

- $P_p : 250\text{ mW}$ et 1064 nm
- $P_{ASE}^+ : 0.2\text{ mW}$
- $P_{ASE}^- : 0.2\text{ mW}$
- $N_2 \approx \rho_{er}$ et $N_1 \approx 0$
- $(\lambda_s) 1064\text{ nm}$

Et nous obtenons :

- P_s
- Proportion d'excitation

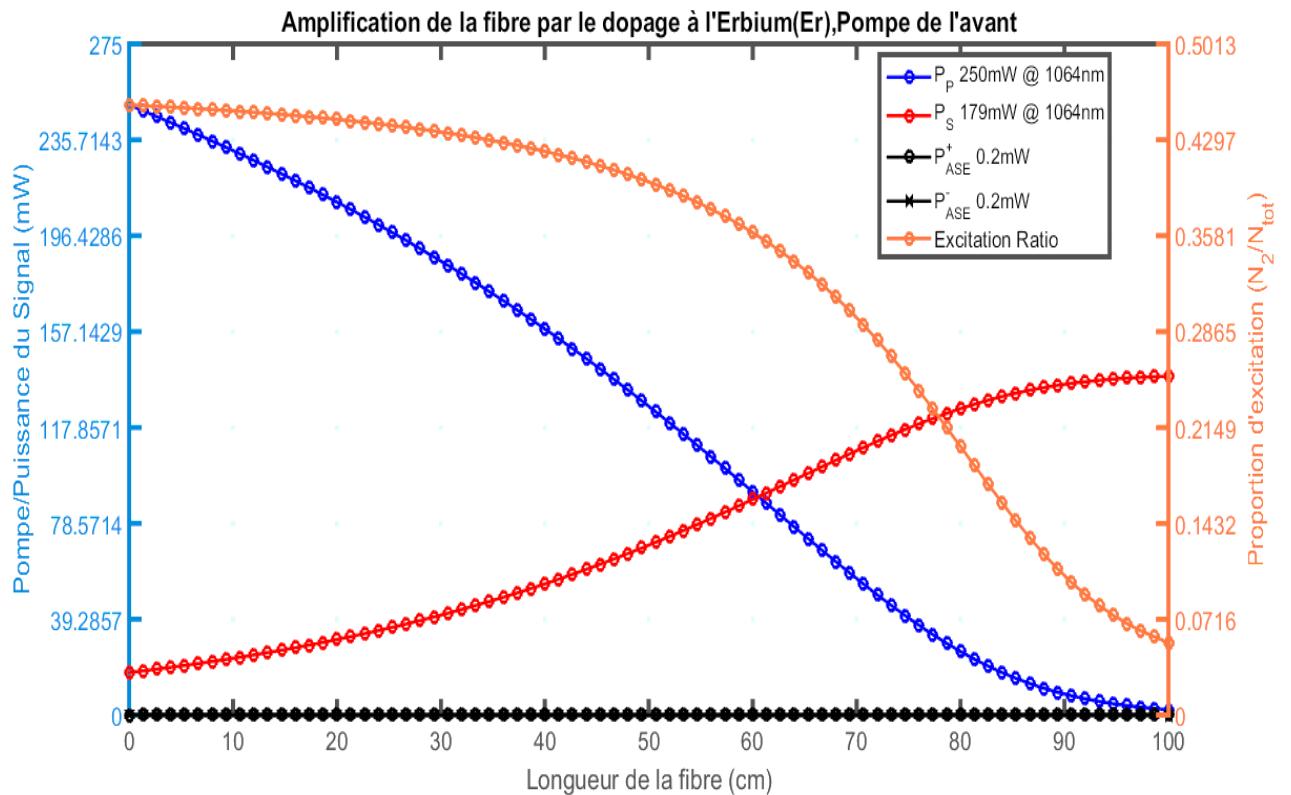


Figure 4.05 : Performance de l'amplificateur pour $P_p=250$ mW et $\lambda=1064$ nm

4.6.2.2 Interprétation

La performance de l'amplificateur pour $P_p= 250$ mW et $\lambda= 1064$ nm sur la figure nous permet d'évaluer 5 courbes :

- La courbe bleue représente la puissance de pompe.
- La courbe rouge représente la puissance de sortie.
- Les deux courbes noires représentent P_{ASE}^+ et P_{ASE}^- .
- La courbe orange représente le taux d'excitation

Comme nous l'avons précisé précédemment, nous avons optimisé les paramètres pour un maximum de rendement. Ici nous avons pris comme valeur : $N_2 \approx \rho_{er}$ et $N_1 \approx 0$ (λ_s) 1064 nm.

Comparer à la courbe précédente pour une puissance de pompe de 250 mW nous obtenons un signal de sortie $P_s = 150$ mW. Ici nous avons doublé la performance de notre amplificateur rien qu'en jouant sur les paramètres influençant le gain. Comme nous avons observé dans l'équation du gain rechercher précédemment, l'influence de N_1 , N_2 et λ_s est mise en évidence dans la recherche de l'optimisation du gain de l'amplificateur.

4.7 Evolution du gain dans une fibre dopée à l'erbium, cas du régime petit signal

Comme nous l'avons démontré précédemment le gain est quasiment constant pour le cas du régime petit signal et P_{sout} est proportionnelle à P_{sin} , en supposant la puissance de pompe fixée.

4.7.1 Paramètre

Pour l'analyse du cas du petit signal nous avons pris comme puissance de pompe P_p les valeurs entre 50 mW et 120 mW. Dans ce passage nous allons prendre une abscisse fixe pour mettre en évidence la variation du gain en fonction de la distance tout en analysant sur un même intervalle de longueur d'onde :

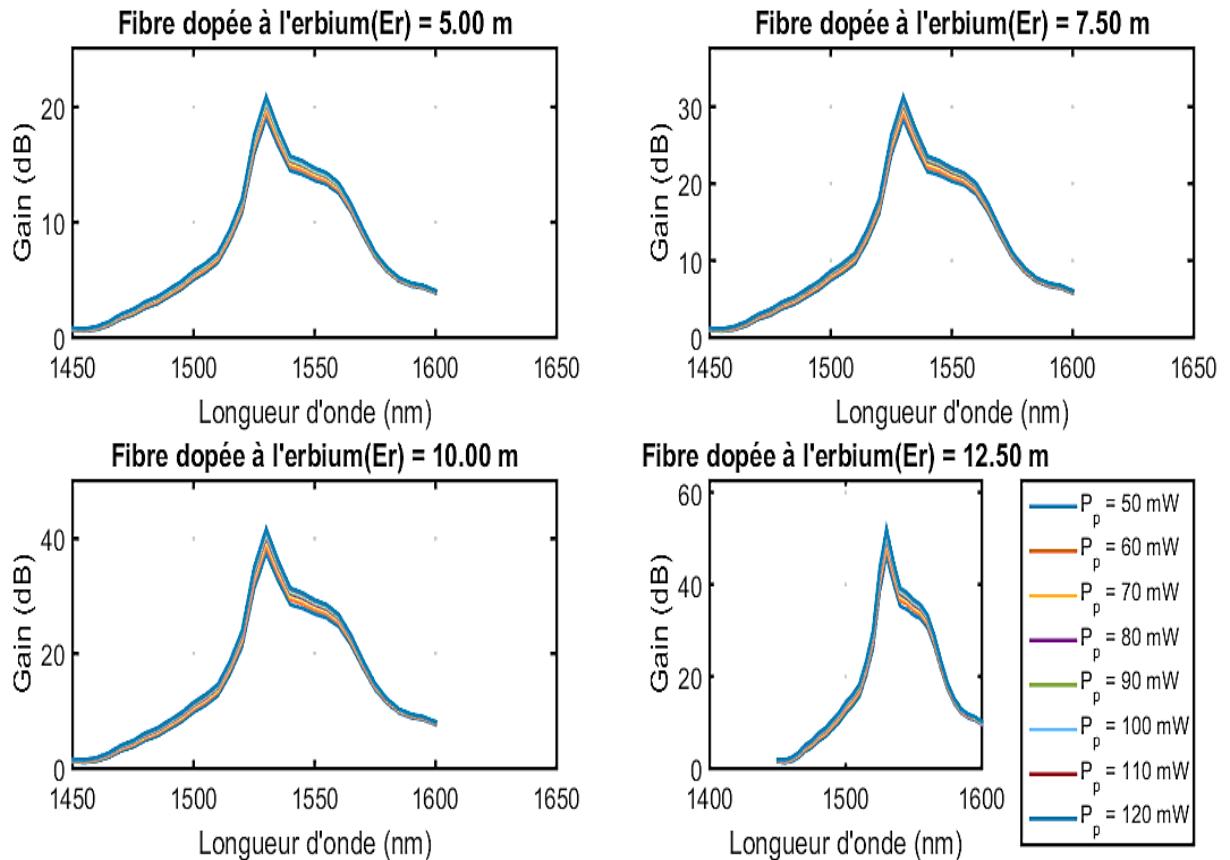


Figure 4.06 : Evolution du gain en fonction de la pompe et de la longueur d'onde dans le cas petit signal

4.7.2 Interprétation

Comme nous l'avons démontré précédemment, le gain est quasiment constant et P_{sout} est proportionnelle à P_{sin} , même en variant la puissance de pompe. Mais le gain évolue en fonction de la longueur de la fibre. Le phénomène d'amplification étant basé sur un transfert d'énergie, la puissance maximale que l'on obtient en sortie de la fibre dopée ne peut excéder $P_{sin} + \frac{\lambda_s}{\lambda_p} P_p$.

4.8 Conclusion

Ce chapitre avait pour objectif d'exposer les études effectuées sur l'amplification optique ainsi que d'expliquer l'évolution du gain pour les amplifications aux terres rares comme dopants actifs comme le cas de l'erbium. Nous avons également présenté les techniques utilisées pour optimiser l'amplification à l'erbium.

CONCLUSION

Le principe de notre mémoire est de pouvoir déterminer les caractéristiques d'une fibre optique dopée à l'erbium tel que la puissance de saturation, la durée de vie et la section efficace d'absorption afin d'optimiser les amplificateurs optiques qui nous permettront de répondre à la demande des différents secteurs d'activités

Nous avons dans ce mémoire explicité la partie théorique de notre projet. En guise de conclusion et afin d'établir la cohérence avec les modèles théoriques développés plus haut, nous introduisons quelques résultats expérimentaux sous un simulateur pour la mesure de l'amplification et de la puissance de saturation et de la durée de vie.

Dans les chapitres précédents, nous avions apporté la preuve que l'amplification à l'erbium varie en fonction d'une équation paramétrique que nous avions retrouvé précédemment dans ce mémoire.

Dans la première partie de ce mémoire nous avons initié les bases nécessaires et indispensables dans un réseau de transmission. Les résultats au niveau de ce chapitre sont indispensables pour l'exploitation des données obtenues dans le quatrième chapitre.

Ensuite dans le second chapitre nous avons explicité les notions de bases sur une fibre optique, cela reste indispensable pour connaître son mode de fonctionnement, ces avantages et ces faiblesses. C'est grâce à ce chapitre que l'étude du problème au niveau de l'amplification dans une fibre optique prend forme.

Le troisième chapitre a été consacré pour l'étude approfondie des notions de base concernant l'amplification à l'erbium. Ce chapitre nous a permis d'exploiter les résultats déjà obtenus sur l'amplification et les bases de cette amplification. C'est à travers ces résultats que nous avons construit nos optimisations pour une meilleure amplification.

Enfin la dernière contribution importante, le chapitre quatre avait traité le fond de notre sujet sur l'étude paramétrique et caractérisation du gain de la fibre dopée à l'erbium. Cela nous a dirigé vers la déduction d'une équation qui régis sur l'évolution du gain au niveau d'une fibre dopée à l'erbium. Les modèles théoriques et les simulations numériques ont mis en exergue les 3 principaux résultats suivants :

- Pour avoir une amplification maximum, la prise en compte de la longueur de la fibre est un paramètre indispensable pour optimiser l'amplification de la puissance du signal. Car il existe une valeur optimale de la longueur de la fibre optique L_{opt} pour laquelle P_{sout} est, au-delà de cette longueur, la puissance de pompe ne permet plus de réaliser l'inversion de population nécessaire à l'amplification du signal d'où la chute du niveau

d'amplification. Cette longueur est retrouvée en fonction de l'étude de la variation de l'équation du gain obtenu précédemment. Pour une optimisation maximum de la transmission la déduction de la valeur L_{opt} est indispensable.

- Dans la partie théorique, l'équation du gain obtenu confirme que plus le niveau fondamental est dépeuplé au profit du niveau métastable, plus grand est le gain. Plus précisément quand N_2 proche de ρ_{er} et N_1 proche de 0 il y a une forte inversion de population. Cette condition peut être obtenue en disposant d'une puissance de pompe élevée et d'un bon recouvrement du champ de faisceau de pompe avec la région dopée.
- Dans le cas petit signal, comme nous l'avons démontré précédemment le gain est quasiment constant et P_{sout} est proportionnelle à P_{sin} , en fixant la puissance de pompe. Plus précisément nous avons démontré qu'en régime de petit signal l'amplification évolue et augmente en fonction de la longueur de la fibre.

Les résultats encourageants de ces recherches effectuées sur des fibres dopées à l'erbium sur leurs optimisations.

Applications :

L'optimisation des amplificateurs à l'erbium nous permet des applications dans les communications optiques à multiplexage de longueurs d'onde (WDM), en vue de l'augmentation des débits de transmission, il est du plus grand intérêt de pouvoir étendre cette bande d'amplification, en n'utilisant qu'une seule et même fibre.

Perspectives :

Les différentes recherches réalisées, nous amènent vers les perspectives suivantes :

- Une étude du bruit de ce type de dispositif devra compléter les recherches sur les fibres amplificatrices et compensatrices de dispersion chromatique.
- Il sera aussi judicieux de rechercher des profils qui permettent de réaliser une compensation large bande de la dispersion chromatique sur l'ensemble de la bande.

Nous pourrions parachever cette étude par une meilleure observation de l'évolution de la dispersion chromatique en fonction de la puissance de pompe. L'ajout d'un atténuateur dans le banc de mesure de dispersion permettrait d'étudier des cas où l'inversion de population est totale dans l'ensemble de la bande et donc de vérifier si ces fibres se distinguent aussi des EDFA classiques par leur dispersion résonante.

Les prochaines préformes réalisées devront être beaucoup moins dopées et posséder une dispersion chromatique négative plus importante pour concevoir un vrai module compensateur de dispersion et amplificateur en travaillant sur des longueurs proches de la centaine de mètres.

ANNEXES

Annexe 1 : Publication de notoriété nationale

MADA-ETI, ISSN 2220-0673, Vol.2, 2017, www.madarevues.gov.mg

Caractérisation du gain et étude paramétrique de la fibre dopée à l'erbium à des fins d'optimisation

Randriana N.H.E¹, Randriamitantsoa P.A.²

Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo

Ecole Doctorale en Science et Technique de l'Ingénierie et de l'Innovation (ED – STII)
Laboratoire de Recherche - Télécommunication, Automatique, Signal et Images (TASI)

Erica_mada@hotmail.com¹, rpauguste@gmail.com²

RESUME

L'EDFA est un amplificateur optique à fibre dopée à l'erbium composé d'une petite longueur de fibre dopée aux ions Er^{3+} . Le signal optique à amplifier ainsi que le laser pompe apportant l'énergie sont couplés dans la fibre dopée et émettent dans la même direction. Cette recherche évalue les performances potentielles des fibres dopées à l'erbium Er^{3+} . Son principal objectif est de proposer des optimisations. Grâce à l'équation du gain retrouvée au niveau de ces travaux de recherche, nous avons pu identifier les paramètres influençant directement le gain tels que $N_2, N_1, \lambda_s, \Gamma_p, \Gamma_s$ and L_0 . Ces paramètres sont évalués grâce à un code de simulation d'amplificateur que nous avons adapté, à partir des données relatives de l'équation d'évolution du gain dans une fibre dopée à l'erbium. Les résultats des mesures expérimentales, comparés à ceux des simulations, sont commentés et analysés.

Mots clés : Fibres optiques, erbium, amplificateurs optiques, gain, optimisation.

ABSTRACT

EDFA is an optical fiber amplifier doped with erbium composed of a small length of fiber doped with the Er^{3+} ions. The optical signal to be amplified as well as the pump laser bringing energy are coupled in the doped fiber and emit in the same direction. This research evaluates the potential performance of erbium-doped optical amplifiers Er^{3+} with the aim of proposing optimizations. So, by the equation of gain found in this research, we have found that the parameters directly influencing the gain such that is: $N_2, N_1, \lambda_s, \Gamma_p, \Gamma_s$ and L_0 . They are evaluated by means of an amplifier simulation code which we have adapted from the relative data of the equation of evolution of the gain in an erbium-doped fiber. The results of the experimental measurements, compared to those of the simulations, are commented and analyzed.

Key words: Optical fibers, erbium, optical amplifiers, gain, optimization

Introduction

L'avènement des amplificateurs à fibre optique dopée aux terres rares et en particulier à l'erbium (EDFA pour Erbium Doped Fiber Amplifier) a rendu possible les liaisons de longue distance et à haut débit. Cependant les EDFA fonctionnent dans la troisième fenêtre des télécommunications optiques autour de 1,55 μm , longueur d'onde qui coïncide bien avec le minimum d'atténuation linéaire des fibres alors que la plupart des réseaux installés sont constitués de fibres monomodes optimisées à 1,30 μm , longueur d'onde pour laquelle leur dispersion chromatique est quasi nulle. Un avantage des EDFA est le fait qu'ils présentent une bande spectrale d'amplification de 30 à 40 nm. Il est donc possible d'amplifier simultanément plusieurs canaux de longueurs d'onde voisines dans cette plage sur une même fibre ou WDM (Wavelength Division Multiplexing).

Le positionnement, l'ordre des modules d'amplification et de compensation de dispersion chromatique au sein de la ligne engendre des problèmes d'optimisation en termes de qualité de réception des signaux transportés. En effet la dégradation du signal varie selon le type de compensation utilisé. En outre, le besoin de limiter les coûts de production, l'encombrement et le poids des lignes ont suscité l'intérêt de développer une fibre optique capable de

réaliser à la fois les fonctions d'amplification et de compensation de dispersion. La nécessité d'une étude approfondie afin d'optimiser l'amplification à l'erbium s'avère cruciale, d'où notre motivation pour cette recherche. Le principe de notre projet est de pouvoir déterminer les caractéristiques d'une fibre optique dopée à l'erbium moyennant la recherche de l'équation du gain. Ils ont porté sur une volonté omniprésente de trouver l'équation d'évolution du gain et de simuler avec le plus de réalisme possible des systèmes de transmission à amplification à l'erbium et les différents composants tel que les constituants, afin de mesurer les performances attendues d'une telle liaison.

1. Concept EDFA

L'amplificateur optique à fibre dopée EDFA peut être représenté par la figure 1. Il est principalement constitué d'une fibre active de quelques mètres de longueur, dopée avec des ions appropriés (Erbium), et connectée à la fibre de ligne, d'une pompe et d'un dispositif de couplage de la lumière de la pompe vers la fibre dopée.

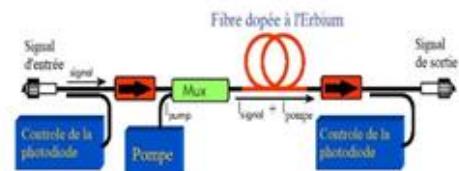


Figure 1 : Amplificateur à l'erbium

2. Affaiblissement

Malgré les performances avérées des fibres optiques, les signaux qui les traversent subissent des atténuations lors de la propagation. Les différents types de pertes sont liés à la diffusion de Rayleigh, l'absorption, la dispersion modale, l'imperfection des connexions, la présence des courbures et micro-courbures à l'intérieur de la fibre.

$$A = \frac{\text{Valeur efficace en sortie}}{\text{Valeur efficace en entrée}} \quad (1)$$

Il ressort du tableau 1 ci-après, une comparaison des atténuations pour différents types de fibres optiques : monomode (SMF) et multimode (MMF), en fonction de la longueur d'onde et de la fréquence correspondante.

FIBRE OPTIQUE			
Type de fibre	Atténuation [dB/km]	Longueur d'onde [nm]	Fréquence [THz]
MMF	≈ 3	850	352,9
MMF + SMF	≈ 0,4	1300	230,7
SMF	≈ 0,2	1550	193,5

Tableau 1 : Comparatif de l'atténuation kilométrique des fibres optiques SMF (Single Mode Fiber) et MMF (Multi Mode Fiber).

Ce tableau comparatif, nous met en exergue que les fibres monomodes exploitées à la longueur d'onde de 1550 nm présentent des atténuations très faibles de l'ordre de 0,2 dB/km. Par contre les fibres multimodes exploitées à une longueur d'onde de 850 nm présentent des atténuations plus importantes de l'ordre de 3 dB/km. Ces valeurs restent tout de même faibles comparées à celles obtenues avec les câbles coaxiaux.

3. Recherche de l'équation du gain

La mesure précise des sections efficaces de l'erbium est très délicate et les notions de base contiennent de nombreux documents décrivant différentes techniques de mesures. Une connaissance précise de des paramètres influençants est néanmoins très importante pour la conception de fibre dopée à l'erbium dans la mesure où la forme spectrale du gain dépend directement des sections efficaces d'émission et d'absorption du milieu.

Les différentes transitions mis en jeu pour l'amplification de signaux à 1550nm par l'ion erbium pompé à 980nm. Le « taux de transition » entre deux niveaux peut être défini comme le nombre de transition par seconde entre ces niveaux.

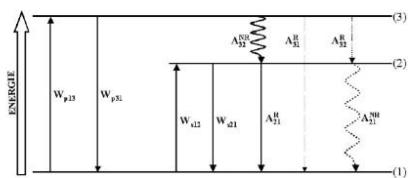


Figure 2 : Diagramme d'énergie de l'ion erbium et taux de transition entre les niveaux lors d'un pompage

Soient N_1 , N_2 et N_3 les densités volumiques de population des niveaux d'énergie (1), (2) et (3). Compte tenu des simplifications citées ci-dessus, les variations de densités de population des différents niveaux sont données par les relations suivantes :

$$\frac{dN_1}{dt} = -W_{p13}N_1 - W_{s12}N_1 + W_{s21}N_2 + A_{21}^R N_2 \quad (2)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = W_{s12}N_1 - W_{s21}N_2 - A_{21}^R N_2 + A_{32}^R N_3 \quad (3)$$

$$\frac{dN_3}{dt} = W_{p13}N_1 - A_{32}^R N_3 \quad (4)$$

La durée de vie des ions erbium sur le niveau 3 étant très faible, Nous pouvons négliger la valeur de N_3 dans l'expression ci-dessous.

$$\rho_{er} = N_1 + N_2 + N_3 \quad (5)$$

Ainsi les équations d'évolution des populations d'un système à deux niveaux sont le point de départ de la modélisation d'un amplificateur optique à fibre dopée à l'erbium, pour notre cas nous avons négligé le niveau N3. Nous obtenons alors le

système d'équation qui s'exprime de la manière suivante :

$$\begin{aligned} \frac{dN_2}{dt} &= (\sigma_s^a N_1 - \sigma_s^e N_2) \frac{P_s}{hv_s A_{eff}} - (N_2 \sigma_p^e - N_1 \sigma_p^a) \frac{P_p}{hv_p A_{eff}} + \\ &(N_1 \sum_j \frac{\sigma^a(v_j) P_{ESA}(v_j)}{hv_j A_{eff}} - N_2 \sum_j \frac{\sigma^e(v_j) P_{ESA}(v_j)}{hv_j A_{eff}} - \frac{N_2}{\tau}) \\ \frac{dN_1}{dt} &= (\sigma_s^e N_2 - \sigma_s^a N_1) \frac{P_s}{hv_s A_{eff}} - (N_1 \sigma_p^a - N_2 \sigma_p^e) \frac{P_p}{hv_p A_{eff}} + \\ &(N_2 \sum_j \frac{\sigma^e(v_j) P_{ESA}(v_j)}{hv_j A_{eff}} - N_1 \sum_j \frac{\sigma^a(v_j) P_{ESA}(v_j)}{hv_j A_{eff}} - \frac{N_1}{\tau}) \end{aligned} \quad (6)$$

Avec :

- N_2 et N_1 : population du niveau supérieur et fondamental de la structure énergétique.
- σ_s^e , σ_s^a et σ_p^e , σ_p^a : sections efficaces d'émission et d'absorption et de pompe et $\sigma^a(v_j)$ et $\sigma^e(v_j)$.
- P_{ESA}^+ et P_{ESA}^- : sections efficaces d'absorption et d'émission.
- v_s et v_p : fréquences du signal et de la pompe, h est la constante de Planck et A_{eff} l'aire effective du mode LP_{01}

Pour mieux représenter les paramètres mise en œuvre, la figure 3 permet de résumer les paramètres influençant l'équation du gain et permet une modélisation d'un amplificateur à fibre optique dopée à l'erbium. L'équation du gain nécessite le calcul de l'évolution de quatre entités. Tout d'abord la puissance du signal de pompe (P_p) nécessaire afin d'inverser le milieu de gain et la puissance

du signal à la longueur d'onde amplifiée (P_s).

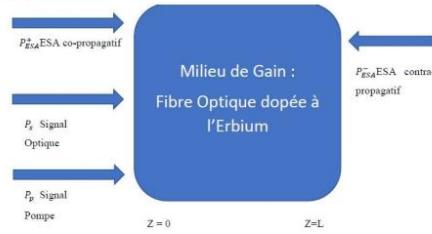


Figure 3 : Schématisation des paramètres de l'amplificateur à fibre dopée à l'erbium en fonction de la longueur de la fibre

L'équation d'évolution de la puissance de pompe ne fait apparaître qu'un terme lié à l'absorption des photons de pompe :

$$\begin{aligned} & \int_0^\infty \int_0^{2\pi} \frac{dP_p(r,t,z)}{dz} r dr d\theta \\ &= -\sigma_a(\lambda_p) \int_0^\infty \int_0^{2\pi} N_1(t,z) I_n(r) P_p(t,z) I_p(r) r dr d\theta \end{aligned} \quad (7)$$

Où

$$\Gamma_p = \int_0^\infty \int_0^{2\pi} I_n(r) I_p(r) r dr d\theta \quad (8)$$

A partir de l'équation traduisant l'évolution longitudinale de la puissance de signal, nous obtenons alors après la dérivation en fonction de z :

$$\frac{dP_s(t,z,\lambda_s)}{dz} = [\sigma_e(\lambda_s)N_2(t,z) - \sigma_a(\lambda_s)N_1(t,z)]\Gamma_s(\lambda_s)P_s(t,z,\lambda_s) \quad (9)$$

Pour la résolution du système nous prenons comme condition initiale :

$$P_s(z=0) = P_{sin}$$

En appliquant sur l'évolution longitudinale :

$$\frac{dP_s(t,z,\lambda_s)}{dz} = [\sigma_e(\lambda_s)N_2(t,z) - \sigma_a(\lambda_s)N_1(t,z)]\Gamma_s(\lambda_s)P_s(t,z,\lambda_s) \quad (10)$$

Nous déterminons alors l'expression de la puissance du signal en sortie d'une fibre amplificatrice de longueur L tel que :

$$\begin{aligned} P_{sout}(\lambda_s) &= \\ & P_{sin}(\lambda_s) \exp \left\{ \int_0^L (\sigma_e(\lambda_s)N_2(z) - \sigma_a(\lambda_s)N_1(z))\Gamma_s(\lambda_s) dz \right\} \end{aligned} \quad (11)$$

Soit le gain se définit par :

$$G = \frac{P_{sout}}{P_{sin}} \quad (12)$$

D'après l'expression de la puissance du signal de sortie, nous pouvons déduire le rapport entre P_{sout} et P_{sin} pour la déduction du gain.

$$\begin{aligned} \frac{P_{sout}(\lambda_s)}{P_{sin}(\lambda_s)} &= \exp \left\{ \int_0^L (\sigma_e(\lambda_s)N_2(z) - \right. \\ & \left. - \sigma_a(\lambda_s)N_1(z))\Gamma_s(\lambda_s) dz \right\} \end{aligned} \quad (13)$$

Nous en déduisons alors l'expression de l'équation du gain :

$$G(\lambda_s) = \exp \left\{ \Gamma_s(\lambda_s) \int_0^L [\sigma_e(\lambda_s)N_2(z) - \right. \\ \left. - \sigma_a(\lambda_s)N_1(z)] dz \right\} \quad (14)$$

- a) Etude du 1^{er} Cas où $P_p=100$ mW et $\lambda=980$ nm

Paramètres de l'amplificateur

- $P_p : 100$ mW et 960 nm
- $P_{ASE}^+ : 0.2$ mW
- $P_{ASE}^- : 0.2$ mW
- $N_2 \neq \rho_{er}$ et $N_1 \approx 0$

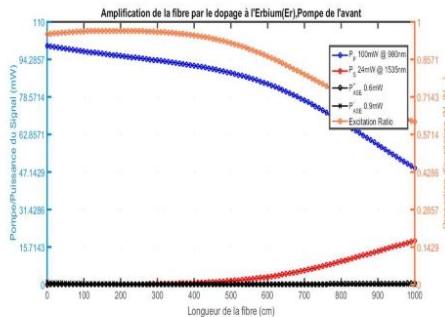


Figure 4 : Modélisation pour $P_p=100$ mW et $\lambda=980$ nm

b) 2^{ème} Cas où $P_p=250$ mW et $\lambda = 1064$ nm

Paramètres de l'amplificateur

- P_p : 250 mW et 1064 nm
- P_{ASE}^+ : 0.2 mW
- P_{ASE}^- : 0.2 mW
- $N_2 \approx \rho_{er}$ et $N_1 \approx 0$
- λ_s = 1064 nm

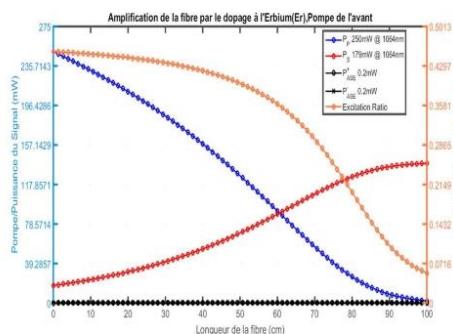


Figure 5 : Modélisation pour $P_p=250$ mW et $\lambda=1064$ nm

4. Interprétation des résultats de l'équation du gain.

Tout d'abord, pour une longueur fixe de fibre amplificatrice, l'équation confirme que plus le niveau fondamental est dépeuplé au profit du niveau métastable (N_2 proche de ρ_{er} et N_1 proche de 0, c'est-à-dire forte inversion de population, plus grand est le gain. Cette condition peut être obtenue en disposant d'une puissance de pompe élevée et d'un bon recouvrement du champ de faisceau de pompe avec la région dopée.

Un deuxième point important est que le gain obtenu avec une fibre optique dopée à l'erbium semble d'autant meilleur que le facteur de recouvrement à la longueur d'onde du signal (λ_s) est élevé. Il faut cependant noter que les densités de population N_1 et N_2 dépendent aussi du recouvrement respectivement aux longueurs d'onde de pompe et de signal.

Le gain est étroitement lié à Γ_p et Γ_s mais l'influence de ces paramètres n'est pas explicitement donnée par l'équation du gain.

5. Conclusion

Pour avoir une amplification maximum, l'équation du gain obtenue confirme que plus le niveau fondamental est dépeuplé au profit du niveau métastable, plus grand est le gain. Plus précisément quand N_2 proche de ρ_{er} et N_1 proche de 0. Il existe une forte

inversion de population. Cette condition peut être obtenue en disposant d'une puissance de pompe élevée et d'un bon recouvrement du champ de faisceau de pompe avec la région dopée.

6. Bibliographie

- [1] B. Le Nguyen, « *Optical Fiber Communication Systems with MATLAB and Simulink Models* », International Standard Book, Huawei Technologies, First edition, p200-360, 2015.
- [2] B. Le Nguyen, « *Optical Fiber Communication Systems with MATLAB and Simulink Models* », International Standard Book, Huawei Technologies, Second edition, p355-401, 2017.
- [3] B. Le Nguyen, « *Ultra-fast fiber laser* », International Standard Book, Huawei Technologies, Second Edition, p300-420, 2017.
- [4] B. J. Eggleton, T. Stephens, P. A. Krug, G. Z. Dhosi, Brodzeli, F. Ouellette, « *Dispersion compensation using a fibre grating in transmission* », Electronics Letters, vol. 32, n°17, p1610-1611, 2016.
- [5] E. Desurvire, « *Erbium-doped fiber amplifiers, principles and applications* », édition Wiley Interscience, 2010.
- [6] K. Takiguchi, K. Okamoto, K. Moriwaki, « *Planar ligthwave circuit dispersion equalizer* », Journal of Ligthwave Technology, vol. 14, n°9, p2003-2011, 2010.
- [7] K. Takiguchi, S. Kawanishi, H. Takara, A. Himeno, K. Hattori, « *Dispersion slope equaliser for dispersion shifted fiber using a lattice-form programmable optical filter on a planar ligthwave circuit* », Journal of Ligthwave Technology, vol. 16, n°9, p1647- 1656, 2011.
- [8] M. Shirasaki, « *Chromatic dispersion compensator using virtually imaged phased array* », IEEE Photonics Technology Letters, vol. 9, n°12, p1598-1600, 2010.

Annexe 2 : Les bases de la lumière

A2.1 Interactions lumière matière

Lorsqu'un atome est soumis à une onde lumineuse trois interactions lumière matière peuvent se produire : l'absorption, l'émission spontanée et l'émission stimulée (figure A1.01).

Lorsqu'un atome est soumis à une onde lumineuse, l'un des électrons de ses couches périphériques peut absorber un photon (figure A1.01(a)). L'atome, initialement dans un état électronique stable d'énergie E_1 , passe alors dans un état électronique excité d'énergie supérieure E_2 . Ce processus d'absorption est d'autant plus efficace que l'énergie du photon, E (égale à $h\nu$, h étant la constante de Planck et ν la fréquence d'émission du photon), est proche de l'écart $E_2 - E_1$ entre les deux niveaux d'énergie de l'atome.

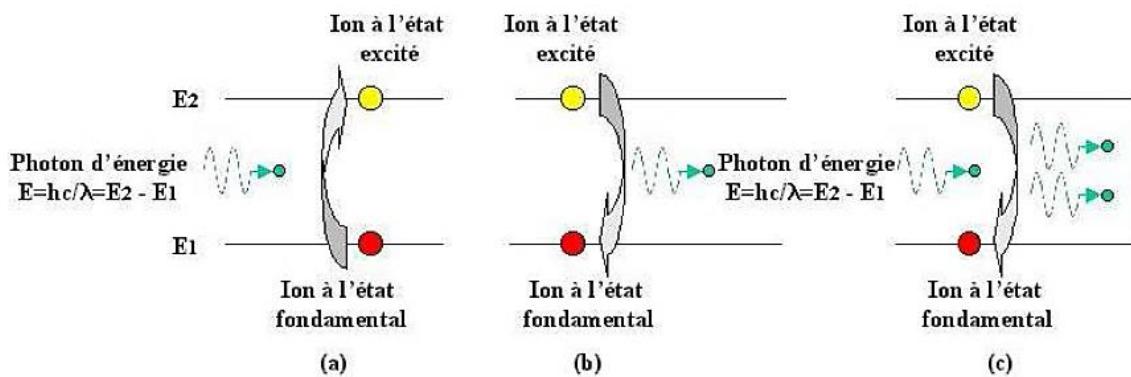


Figure A1.01 : Interactions lumière matière : (a) absorption, (b) émission spontanée, (c) émission stimulée

Les états électroniques excités ne sont pas stables. Plus ou moins vite, l'ion revient à l'état fondamental en émettant un photon (Figure A1.01 (b)). Soit τ , la durée de vie de l'état excité, défini comme étant le temps au bout duquel la densité de population des ions excités est divisée par e après le début de l'émission spontanée. Le photon est émis dans une direction et avec une polarisation qui sont aléatoires, mais son énergie E (toujours égale à $h\nu$) est identique à la différence d'énergie $E_2 - E_1$ entre les deux niveaux atomiques mis en jeu.

La présence d'un rayonnement lumineux incident peut provoquer l'ion excité à l'émission d'un photon ayant les mêmes caractéristiques que le photon incident (Figure A1.01(c)).

Cependant, cela n'est possible que lorsque l'énergie de ce photon est « résonnante », c'est-à-dire quand l'énergie E (égale à $h\nu$) est égale à l'écart d'énergie $E_2 - E_1$ entre le niveau supérieur (2) et le niveau inférieur (1). Dans cette émission induite qui constitue la réciproque du processus d'absorption, le photon créé par l'atome en se désexcitant a même fréquence et même direction de propagation que le photon incident. Ce phénomène, qui permet d'amplifier une

onde lumineuse, est à la base du fonctionnement des amplificateurs à fibres dopées aux terres rares.

A2.2 Inversion de population et pompage

Pour qu'un signal lumineux soit amplifié, il faut que la probabilité qu'un de ses photons soit absorbé par un ion à l'état fondamental soit inférieure à celle que ce photon provoque la désexcitation d'un ion excité. Pour cela il faut que le nombre d'ions à l'état excité soit supérieur à celui des ions à l'état fondamental. Dans ce cas, on parle d'inversion de population.

Cependant, si le milieu amplificateur n'est pas soumis à un rayonnement extérieur, le nombre d'ions excités est nettement inférieur au nombre d'ions non excités. L'inversion de population est rendue possible grâce au processus de pompage qui n'est autre que l'apport d'énergie extérieure permettant l'inversion de population. Dans le cas des fibres optiques dopées aux terres rares, le pompage est de nature optique.

A2.3 Systèmes à trois niveaux

Les trois mécanismes cités ci-dessus entrent en jeu dans l'amplification optique par les terres rares. Si on considère le cas de l'ion erbium pompé à la longueur d'onde λ_p égale à 980 nm, on a affaire à un système à trois niveaux. Le processus se déroule ainsi (figure A1.02) :

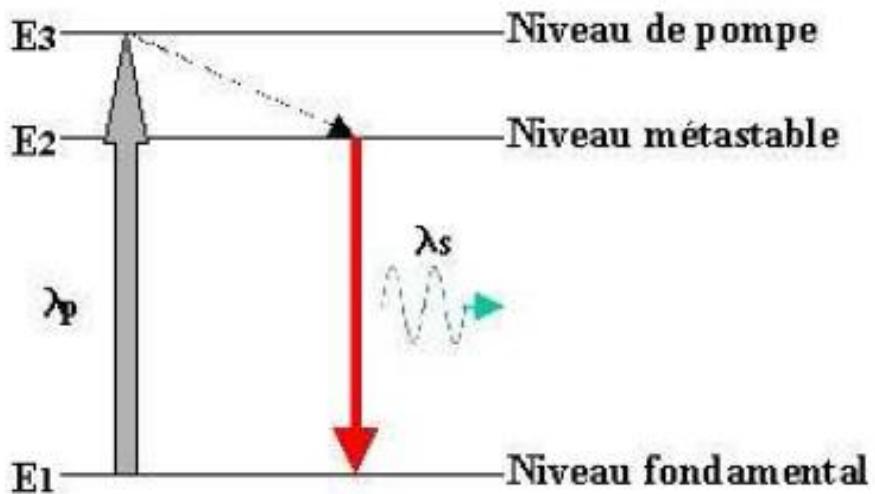


Figure A1.02 : Système à trois niveaux de l'erbium

Les ions initialement au niveau fondamental sont excités au niveau le plus haut dit de pompe par l'absorption d'un photon à la longueur d'onde λ_p . Ensuite, les ions se relaxent très

rapidement sur le niveau métastable sans engendrer d'émission radiative. Soit N_1 et N_2 les densités de population respectives des niveaux d'énergie E_1 et E_2 . Comme la durée de vie du niveau de pompe est très faible devant celle du niveau métastable, on a un très grand nombre d'ions à l'état excité, et par conséquent, la population de N_2 est supérieure à N_1 .

L'inversion de population est ainsi réalisée. Une émission d'ion radiative se produit entre les niveaux d'énergie E_2 et E_1 et la longueur d'onde λ_s du photon créé est proche de 1550 nm.

Il est à noter que dans ces systèmes à trois niveaux, le signal à amplifier est absorbé et donc atténué si l'inversion de population n'est pas réalisée c'est-à-dire si le pompage est insuffisant. La loi de Planck nous donne les relations telles que : (avec h constante de Planck et c la vitesse de la lumière dans le vide)

$$E_3 - E_2 = \frac{hc}{\lambda_p} \quad \text{A1.1}$$

$$E_2 - E_1 = \frac{hc}{\lambda_s} \quad \text{A2.1}$$

A2.4 Structure vitreuse des fibres optiques standards

Il existe un grand nombre de types de fibres optiques. Celles utilisées dans les télécommunications sont fabriquées à partir de silice. Leur structure est composée 58 d'éléments tétraédriques de base (silicates SiO_4) : un atome formateur, Si, est relié par des liaisons covalentes à quatre atomes d'oxygène (Figure A1.03).

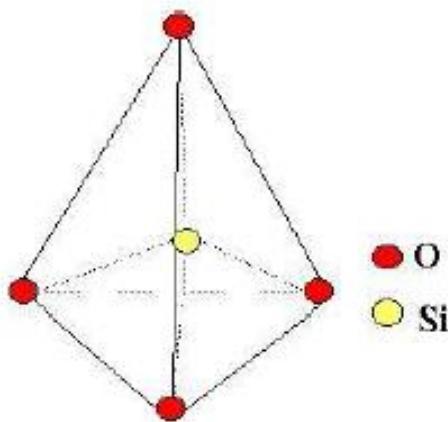


Figure A1.03 : Élément tétraédrique silicate de la silice vitreuse

Si un ion oxygène est relié à deux ions de silice, il est appelé ion « pontant ».

Il est possible de faire varier les propriétés optiques ou physiques du verre de silice grâce à l'incorporation d'ions dits « dopants » ou « modificateurs » dans la structure :

- Le germanium, l'aluminium, le phosphore et le titane sont utilisés pour augmenter l'indice de réfraction.
- Le bore et le fluor, à l'inverse, font diminuer l'indice de réfraction.

Annexe 3 : Équations spatio-temporelles

A3.1 Taux de transitions

Les différents paramètres que nous avons vus caractérisant les amplificateurs à fibre dopée à l'erbium comme le gain ou le rapport signal à bruit sont définis à partir des puissances de signal, de pompe et de bruit d'ASE. Pour connaître le fonctionnement d'un amplificateur, il nous faut donc déterminer ces puissances. Pour cela nous allons donc revoir les phénomènes régissant l'amplification dans le cas de l'ion erbium fonctionnant avec trois niveaux d'énergie et définir les équations entrant en jeu au cours des différentes étapes de l'amplification. Nous donnerons dans un premier temps les probabilités des transitions possibles appelées taux de transitions nécessaires pour écrire les différentes équations. Puis nous expliquerons ce que sont les facteurs de confinement du mode optique de la fibre sur la zone dopée qui traduisent l'interaction entre les ions erbium et le signal ou mode de la fibre amplificatrice. Enfin nous définirons les équations nécessaires à l'étude de l'amplification d'une fibre dopée à l'erbium.

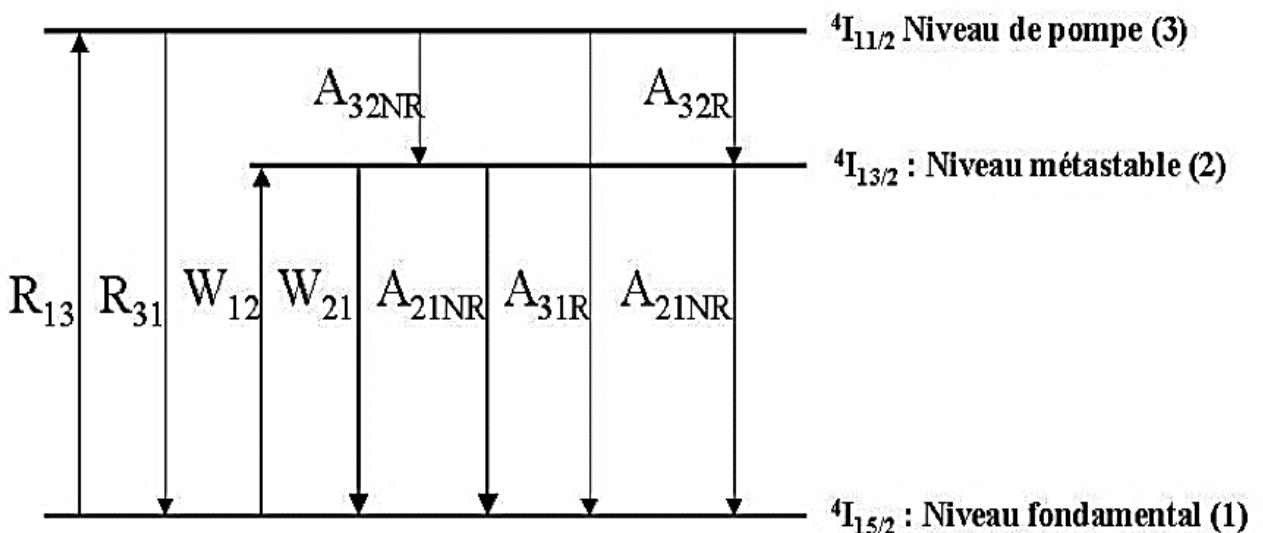


Figure A2.01 : Diagramme des niveaux d'énergie de l'ion erbium correspondant à un système

A3.2 Laser à trois niveaux

La figure 95 nous donne le bilan de toutes les transitions possibles entre les différents niveaux d'énergie entrant en jeu au cours de l'amplification dans un système à trois niveaux.

Par définition les niveaux (1), (2) et (3) sont respectivement le niveau fondamental, métastable et de pompe. Le niveau (2) se caractérise par une durée de vie longue, notée τ ,

approximativement égale à 10 ms. La transition laser qui nous intéresse se produit entre les niveaux (1) et (2).

A3.3 Facteur de confinement

En règle générale, le dopage en erbium d'une fibre amplificatrice est réalisé dans le cœur de la fibre avec une distribution spectrale de concentration $\rho(r)$ telle que $\rho(r)$ est constante et égale à ρ pour un rayon inférieur à celui du cœur ; hors de cette région $\rho(r)$ est nulle.

Le facteur de confinement exprime la proportion du mode optique guidé dans la fibre interagissant avec les ions erbium. Comme la forme et la taille du mode varient en fonction du profil d'indice de réfraction et de la longueur d'onde, le facteur de confinement, lui aussi, est fonction de la longueur d'onde pour un profil donné. Les facteurs de confinement aux longueurs d'onde de signal λ_s et de pompe λ_p sont respectivement notés λ_s et λ_p .

Les répartitions des puissances de signal, de pompe et de bruit d'ASE ne sont pas homogènes le long de la fibre. Les variations de ces puissances et des densités de population des différents niveaux d'énergie en fonction de z doivent être prises en compte pour modéliser le fonctionnement d'un amplificateur à fibre dopée à l'erbium pompé à 980 nm. L'équation est en fonction des facteurs de confinement de pompe et de signal, des sections efficaces d'absorption et d'émission, et de la position z dans l'amplificateur.

A3.4 Caractéristiques des fibres dopées NPs: cas de l'Erbium

Les figures A2.02 et A2.03 sont utiles pour mener une étude comparative des procédés NP et procédé standard.

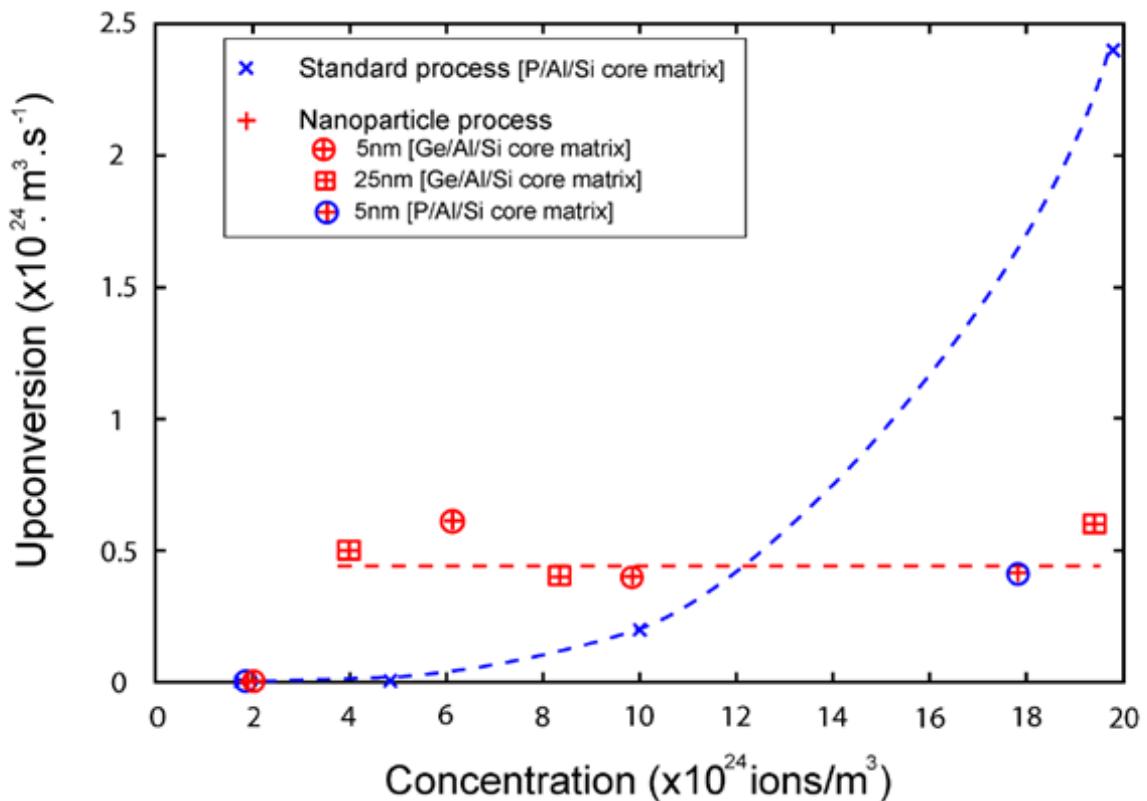


Figure A2.02 : Evolution de la concentration en upconversion

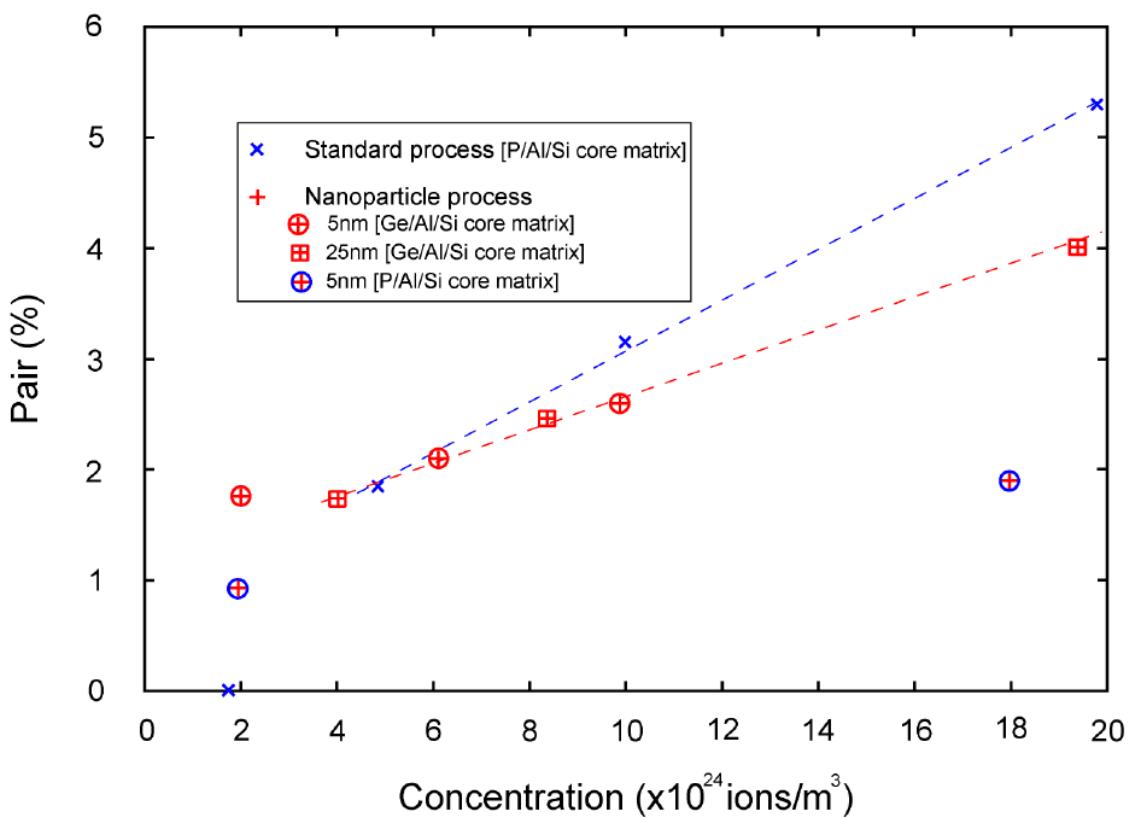


Figure 2.03 : Evolution de la concentration % paires Er

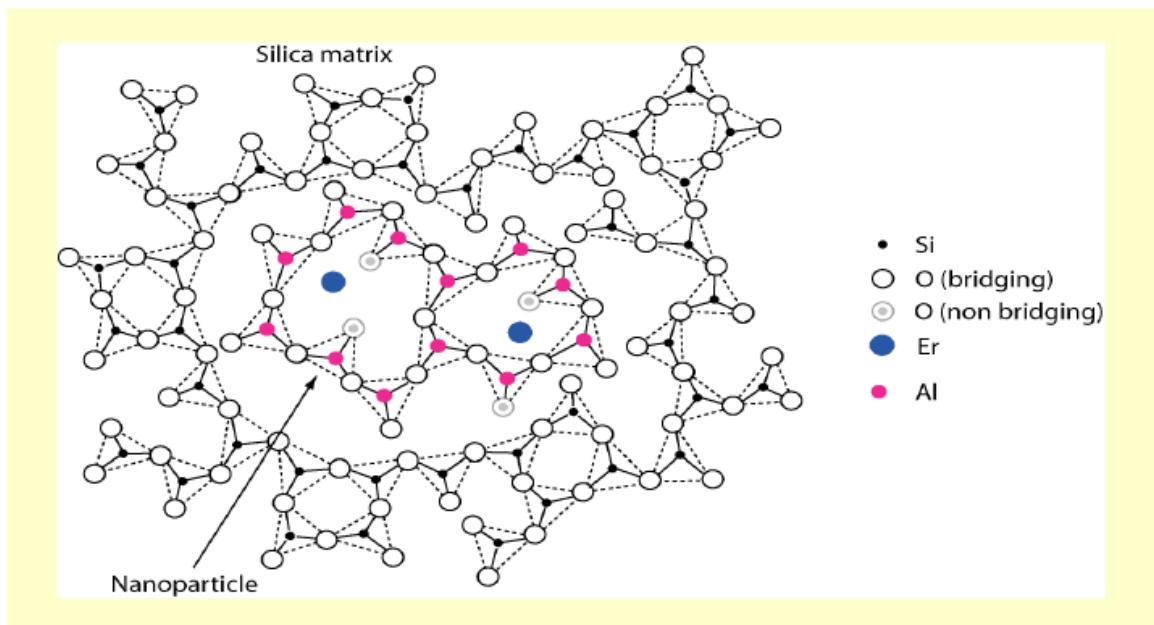


Figure A2.03 : Environnement et dispersion des Er^{3+} dépendent de la composition des NPs

A2.5 Evolution du % paires Er

- Wup (HUC) pratiquement indépendant de la [Er] dans les fibres dopées NP
- Possibilité d'éliminer le HUC par ajustement du rapport Al/Er des NPs
- Formation limitée de paires Er en fonction de la [Er] dans les fibres dopées NP
- Possibilité d'éliminer le PIQ en améliorant le design des NPs

A2.6 Exemple d'amplification à l'erbium

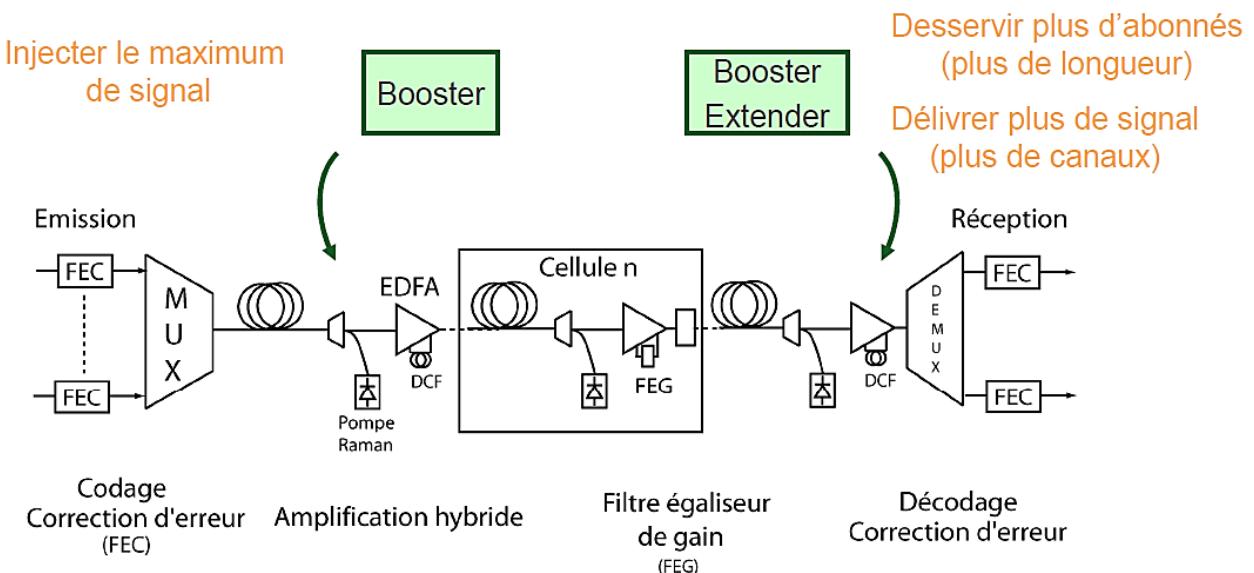


Figure A2.04 : Exemple de système de transmission terrestre WDM longue distance

Annexe 4 : Code Matlab

```
function [data hFig] = erbium_amplifier(s)
debugFlag = 0;
if nargin<1, s = struct; end
if ~isfield(s,'re'), s.re = 'erbium'; end
if ~isfield(s,'mode'), s.mode = 'wavelength'; end
if ~isfield(s,'plotFlag'), s.plotFlag = 1; end
switch lower(s.re(1))
    case 'e'
        if ~isfield(s,'L'),
            s.L = 10;
            multLflag = true;
        else
            multLflag = false;
        end
        if ~isfield(s,'Ps'), s.Ps = 30e-6; end
        if ~isfield(s,'Pp'),
            s.Pp = 100e-3;
            multPflag = true;
        else
            multPflag = false;
        end
        if ~isfield(s,'lamS'), s.lamS = 1535e-9; end
        if ~isfield(s,'lamP'), s.lamP = 980e-9; end
        if ~isfield(s,'alpha'), s.alph = 6.5; end
        if ~isfield(s,'Nt'), s.Nt =
ConvAbsDB2N(s.alph,GetErSpectrum(1530)); end
        if ~isfield(s,'dCore'), s.dCore = 5.5e-6; end
        if ~isfield(s,'Gamma'), s.Gamma = 0.722; end
        if ~isfield(s,'dField'), s.dField = s.dCore / s.Gamma; end
        wl = 1e-9 * (1450:5:1600);
    case 'y'
        if ~isfield(s,'L'),
            s.L = 1;
            multLflag = true;
        else
            multLflag = false;
        end
        if ~isfield(s,'Ps'), s.Ps = 10e-3; end
        if ~isfield(s,'Pp'),
```

```

s.Pp = 250e-3;
multPflag = true;
else
    multPflag = false;
end
if ~isfield(s,'lamS'), s.lamS = 1064e-9; end
if ~isfield(s,'lamP'), s.lamP = 975e-9; end
if ~isfield(s,'alpha'), s.alph = 350; end
if ~isfield(s,'Nt'), s.Nt = ConvAbsDB2N(s.alph,GetErSpectrum(975));
end
if ~isfield(s,'dCore'), s.dCore = 6e-6; end
if ~isfield(s,'Gamma'), s.Gamma = 0.722; end
if ~isfield(s,'dField'), s.dField = s.dCore / s.Gamma; end
wl = 1e-9 * (1020:5:1100);
end

if isfield(s,'multPflag'), multPflag = s.multPflag; end
if isfield(s,'multLflag'), multLflag = s.multLflag; end
switch lower(s.mode(1))
    case 'p'
        nW = 1;
        wl = s.lamS;
        wlp = s.lamP;
        Pp = s.Pp * (1:1:100)/100;
        if multLflag
            L = s.L * (50:25:125)/100;
        else
            L = s.L;
        end
    otherwise
        nW = length(wl);
        wlp = s.lamP;
        if multPflag
            Pp = s.Pp * (50:10:120)/100;
        else
            Pp = s.Pp;
        end
        if multLflag
            L = s.L * (50:25:125)/100;
        else
            L = s.L;
        end
    end
end

```

```

    end
end

A = pi*((s.dCore/2)^2);
h = 6.62606957e-034;
c = 3e8;

nup = c/wlp;
switch lower(s.re(1))
    case 'y'
        [sal,sel] = GetYbSpectrum(wl);
        [sap,sep] = GetYbSpectrum(wlp);
        qe = 1;
        tau = 0.77e-3;
        fiberStr = 'Yb-Doped';
    case 'e'
        [sal,sel] = GetErSpectrum(wl);
        [sap,sep] = GetErSpectrum(wlp);
        tau = 8e-3;
        qe = 0.85;
        fiberStr = 'Er-Doped';
    end

PpSat = (h*nup*A/s.Gamma)/((sap+sep)*tau*qe
for ll = 1: numel(L)
    for pp = 1: numel(Pp)
        Ppl(pp) = SolveForPpz(Pp(pp), PpSat, -s.Gamma*s.Nt*sap*L(ll));
        Pa(pp) = Pp(pp)-Ppl(pp);
        for ww = 1: numel(wl)
            G(ww,pp,ll) =
(10*log10(exp(1)))*(qe*(sal(ww)+sel(ww))*tau*Pa(pp))./(h*nup*A/s.Gamma) -
s.Gamma*s.Nt*sal(ww)*L(ll));
        end
        legStr{pp} = sprintf('P_p = %d mW', round(1000*Pp(pp)));
    end
end

if s.plotFlag
    switch lower(s.mode(1))
        case 'p'
            cmap = hsv(length(L));

```

```

hFig = figure('windowstyle','docked');
for ll = 1:length(L);

plot(1000*Pp,G(1,:,:ll),'linewidth',2,'color',cmap(ll,:),'marker','o'); hold
on;
legStr{ll} = sprintf('%.2f m',L(ll));
end
hT = title(sprintf('Single-Pass Gain at %d nm\nUsing %s
Fiber',round(wl*1e9),fiberStr)); set(hT,'fontsize',16);
set(gca,'fontsize',14,'linewidth',2); grid on;
xlabel(sprintf('Pump power (mW) at %d nm',round(wlp*1e9)));
ylabel('Single-Pass Gain (dB)');
legend(legStr,'Location','Best');

otherwise

hFig = figure('windowstyle','docked');
nAxX = max([1,floor(length(L)/2
nAxY = ceil(length(L)/nAxX
for ll = 1:length(L)
subplot(nAxX,nAxY,ll);
plot(wl*1e9,G(:,:,ll),'linewidth',2);
hT = title(sprintf('Fibre dopée à l''erbium(Er) = %.2f
m',L(ll))); set(hT,'fontsize',16);
set(gca,'fontsize',14,'linewidth',2); grid on;
xlabel ('Longueur d''onde (nm)'); ylabel('Gain (dB)');
hold on;
ylim([0 1.2*max(max(G(:,:,ll)))]));
end
legend(legStr,'Location','EastOutside');

end
end
data = {G wl};
end
function [solution,residual] = SolveForPpz(Pp0,Ps,k)

if nargin<1
Pp0 = 0.01;
Ps = 0.002;
N = 1.5e25;
sap = 8e-25;
z = 1;

```

```

k = -N*sap*z;
end

Ppz = Pp0*exp(k);
res = log(Ppz/Pp0) + (Ppz-Pp0)/Ps - k;
absDb = [0:0.001:60];
txLin = 10.^(-absDb./10);
Ppz = txLin*Pp0;
res = log(Ppz./Pp0) + (Ppz-Pp0)./Ps - k;
[minres,iimin] = min(abs(res));
solution = Ppz(iimin);
residual = minres;
end

```

BIBLIOGRAPHIES

- [1.01] B. J. Eggleton, T. Stephens, P. A. Krug, G. Z. Dhosi, Brodzeli, F. Ouellette, « *Dispersion compensation using a fibre grating in transmission* », Electronics Letters, vol. 32, n°17, p1610-1611, 2016.
- [1.02] E. Desurvire, « *Erbium-doped fiber amplifiers, principles and applications* », édition Wiley Interscience, 2010.
- [1.03] F. Gérome, « *Etude des télécommunications hautes fréquences* », rapport de DEA de l'Université de Limoges, juillet 2017.
- [1.04] F. X Olivier, C. Zugno, S. Thompson, « *L'évolution des réseaux d'infrastructure DWDM à haut débit* », Revue des Télécommunications d'Alcatel, p181-193, 3ème trimestre 2015.
- [1.05] G. Huss, « *Interféromètres stellaires réalisés à partir de composants d'optique guidée et intégrée* », thèse de doctorat de l'Université de Limoges, 2011.
- [1.06] J. L. Auguste, « *Conception, réalisation et caractérisation d'une fibre à forte dispersion négative* », Thèse de doctorat de l'Université de Limoges, 2001.
- [1.07] M. Durkin, M. J. Ibsen, M. J. Cole, R. I. Laming, « *1 m long continuously written fibre Bragg gratings for combined second and third-order dispersion compensation* », Electronics Letters, vol. 33, n°22, p1891-1893, 2002.
- [1.08] P. Lecoy, « *Télécommunications sur fibres optique* », édition Hermès, 2^{ème} édition revue et augmentée, 2014.
- [1.09] R. L. Lachance, Y. Painchaud, A. Doyle, « *Fiber gratings and chromatic dispersion* », TeraXion, ICAPT2002, juin 2012.
- [1.10] T. Mya, Y. Terunuma, T. Hosaka, T. Miyoshita « *Ultimate low-loss single mode fibre at 1.55 μ m* », Electronics Letters, vol. 15, p106-108, 2015.
- [1.11] V. Srikant V., « *Broadband dispersion and dispersion compensation in high bit rate and ultra-long-haul systems* », Proceedings OFC2001, TuH1-1, 2010.
- [1.12] W. A. Gambling, « *The rise and rise of Optical fibers* », IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics, vol. 6, n°6, p1084-1093, 2017.
- [2.01] C. K. Madsen, G. Lenz, A. J. Bruce, M. A. Cappuzzo, L. T. Gomez, R. E. Scotti, « *Integrated all-pass filters for tunable dispersion and dispersion slope compensation* », IEEE Photonics Technology Letters, vol. 11, n°12, p 1623-1625, 2005.
- [2.02] H. Ooi, K. Nakamura, Y. Akiyama, T. Takahara, T. Terahara, Y. Kawahata, H. Isono, G. Ishikawa, « *40 Gb/s WDM Transmission with virtually imaged phased*

- array (VIPA) variable dispersion compensator s», Journal of Lighwave Technology, vol. 20, n°12, p2196-2203, 2002.*
- [2.03] K. Takiguchi, K. Okamoto, K. Moriwaki, « *Planar lighwave circuit dispersion equalizer* », Journal of Lighwave Technology, vol. 14, n°9, p2003-2011, 2006.
- [2.04] K. Takiguchi, S. Kawanishi, H. Takara, A. Himeno, K. Hattori, « *Dispersion slope equaliser for dispersion shifted fiber using a lattice-form programmable optical filter on a planar lighwave circuit* », Journal of Lighwave Technology, vol. 16, n°9, p1647- 1656, 2011.
- [2.05] M. Shirasaki, « *Chromatic dispersion compensator using virtually imaged phased array* », IEEE Photonics Technology Letters, vol. 9, n°12, p1598-1600, 2006.
- [2.06] M. Shirasaki, « *Virtually imaged phased array* », Fujitsu Scientific & Technical Journal, n°8, p113-125, 2000.
- [2.07] M. Shirasaki, S. Cao., « *Compensation of chromatic dispersion and dispersion slope using virtually imaged phased array* », Proceedings of OFC2001, TuS1-1, 2001.
- [2.08] M. S. Orella, Ramamurthy, B Mukherjee, « *Optical components for WDM lightwave networks* », Proceedings of the IEEE, vol. 85, n°8, p1274-1307, 1997.
- [2.09] O. Gautheron, « *Les réseaux optiques sous-marin* », Revue des Télécommunications d'Alcatel, p171-179, 3° trimestre 2016.
- [2.10] Y. Painchaud, A. Mailloux, H. Chotard, E. M. Pelletier, Guy « *Multi-channel fiber Bragg gratings for dispersion and slope compensation* », Proceedings of OFC2002, p581-582, 2002.
- [2.11] Y. Painchaud, H. Chotard, A. Mailloux, Y. Vasseur, « *Superposition of chirped fibre Bragg grating for third-order dispersion compensation over 32 WDM channels* », Electronics Letters, vol. 38, n°24, p1572-1573, 2002.
- [3.01] A. Bjarklev, « *Optical fiber amplifiers: design and systems applications* », édition Artech House, 2014.
- [3.02] A. H. Gnauck, L.D. Y. Garrett, Danziger, U. Levy, M. Tur, « *Dispersion and dispersion-slope compensation of NZDSF over the entire C band using higher-order mode fibre* », Electronics Letters, vol. 36, n°22, p1946-1947, 2000.
- [3.03] A. L. Schawlow, C.H. Townes, « *Infrared and optical masers* », Physical Review, vol. 112, n°6, p1940-1949, 2008.

- [3.04] B. Dussardier, « *Fibres optiques dopées aux terres rares. Fabrication, caractérisation et amplification selective* », Thèse de doctorat de l’Université de Nice Sophia Antipolis, 2012.
- [3.05] C. K. Madsen, S. Chandrasekhar, E. J. Laskowski, K. Bogart, M. Cappuzzo, A. Paunescu, L. W. Stulz, L. T. Gomez, « *Compact integrated tunable dispersion compensator with a 4000 ps/nm tuning range* », IEEE Photonics Technology Letters, vol.11, n°12, 2011.
- [3.06] C. J. Koester, E.A. Snitzer, « *Amplification in a fiber laser* », Applied Optics, vol. 3, n°10, p1182-1186, 2007.
- [3.07] E. Desurvire, J.R. Simpson, « *Evaluation of 4I15/2 and 4I13/2 Stark level energies in erbium-doped aluminosilicate glass fibers* », Optics Letters, vol. 15, n°10, p547-549, 2012
- [3.08] J. L. Auguste, J.M. Blondy, J. Maury, J. Marcou, B. Dussardier, G. Monnon, R. Jindal, K. Thyagarajan, B.P. Pal, « *Conception, realization, and characterisation of a very high negative chromatic dispersion fiber* », Optical Fiber Technology, vol. 8, p89-105,2010.
- [3.09] J. L. Auguste, R. Jindal, J. M. Blondy, M. Clapeau, J. Marcou, B. Dussardier, G. Monnom, D.B. Ostrowsky, B.P. Pal, K. Thyagarajan, « *-1800 ps/(nm.km) chromatic dispersion at 1.55 micrometer in dual concentric core fibre* », Electronics Letters, vol. 36, p1689-1690, 2000.
- [3.10] J. Stone, C.A. Burrus, « *Nd-doped SiO₂ lasers in end pumped fibre geometry* », Applied Physics Letters, vol. 23, p388-389, 1973.
- [3.11] K. Thyagarajan, R.K. Vardhney, P. Palai, A.K. Ghatak, I.C. Goyal, « *A novel design of a dispersion compensating fiber* », IEEE Photonic Technology Letters, vol. 8, n°11, p1510-1511, 2012.
- [3.12] P. Roy, « *Lasers déclenchés à fibres dopées à l’erbium pour applications à la télémetrie* », Thèse de doctorat de l’Université de Limoges, 2015.
- [3.13] R.J. Mears, L. Reekie, S.B. Poole, D.N. Payne, « *Low-threshold tunable cw and Q-switched fibre laser operating at 1.55 μm* », Electronics Letters, vol. 22, n°3, p159-160, 2016.
- [3.14] R. J. Mears, L. Reekie, I.M. Jauncey, D.N. Payne, « *Low-noise erbium-doped fibre amplifier operating at 1.54 μm* », Electronics Letters, vol. 23, n°19, p1026-1028, 2014.

- [3.15] S. B. Poole, D.N. Payne, M.E. Fermann, « *Fabrication of low-loss optical fibers containing rare-earth ions* », Electronics Letters, vol. 21, n°17, p737-738, 2015.
- [3.16] S. B. Poole, J. E. Townsend, D. N. Payne, « *Solution doping technique for fabrication of rare earth* », Electronics Letters, vol. 23, n°7, p329-331, 1987.
- [3.17] S. Ghalmi, S. Ramachandran, E. Monberg, Z. Wang, M. Yan, F. Dimarcello, W. Reed, P. Wisk, J. Fleminf, « *Low-loss, all-fibre higher-order-mode dispersion compensators for lumped or multi-span compensation* », Electronics Letters, vol. 38, n°24, p1507-1508, 2002.
- [3.18] S. Ramachandran, G. Raybon, B. Mikkelsen, M. Yan, L. Cowsar, J. Essiambre, « *1700 km transmission at 40 Gbit/s with 100 km amplifier spacing by higher-order-mode dispersion compensation* », Electronics Letters, vol. 37, n°22, p1352-1353, 2001.
- [4.01] B. Le Nguyen, « *Optical Fiber Communication Systems with MATLAB and Simulink Models* », International Standard Book, Huawei Technologies, First edition, p200-360, 2015.
- [4.02] B. Le Nguyen, « *Optical Fiber Communication Systems with MATLAB and Simulink Models* », International Standard Book, Huawei Technologies, Second edition, p355-401, 2017.
- [4.03] B. Le Nguyen, « *Ultra-fast fiber laser* », International Standard Book, Huawei Technologies, Second Edition, p300-420, 2017.

FICHE DE RENSEIGNEMENT

Nom : RANDRIANA
Prénom : Heritiana Nambinina Erica
Adresse : Lot 46 ter Mandriambero
Téléphone : +261 34 74 729 91
Email : Erica_mada@hotmail.com



Titre du mémoire :

**« CARACTERISATION DU GAIN ET ETUDE PARAMETRIQUE DE LA FIBRE
DOPEE A L'ERBIUM A DES FINS D'OPTIMISATION »**

Nombre de pages : 128

Nombre de figures : 61

Nombre de tableaux : 7

Mots clés : Fibres optiques, erbium, amplificateurs optiques, facteur de recouvrement, optimisation.

DIRECTEUR DE MEMOIRE :

Mr RANDRIAMITANTSOA Paul Auguste

Grade : Professeur Titulaire

Téléphone : 034 10 342 58

Mail : rpauguste@gmail.com

RESUME

L'EDFA est un amplificateur optique à fibre dopée à erbium composé d'une petite longueur de fibre dopée aux ions Er^{3+} . Le signal optique à amplifier ainsi que le laser pompe apportant l'énergie sont couplés dans la fibre dopée et émettent dans la même direction.

Ce mémoire évalue les performances potentielles de l'amplificateurs optiques dopées à l'erbium Er^{3+} . Son principal objectif est de proposer des optimisations. Grâce à l'équation du gain retrouvée au niveau de ce mémoire, nous avons pu identifier les paramètres influençant directement le gain tels que : $N_2, N_1, \lambda_s, \Gamma_p, \Gamma_s$ et L_0 . Les paramètres sont évalués grâce à un code de simulation d'amplificateur que nous avons adapté, à partir des données relatives de l'équation d'évolution du gain dans une fibre dopée à l'erbium. Les résultats des mesures expérimentales, comparés à ceux des simulations, sont commentés et analysés.

Mots clés : Fibres optiques, erbium, amplificateurs optiques, gain, optimisation.

ABSTRACT

EDFA is an optical fiber amplifier doped with erbium composed of a small length of fiber doped with the Er^{3+} ions. The optical signal to be amplified as well as the pump laser bringing energy are coupled in the doped fiber and emit in the same direction.

This thesis evaluates the potential performance of erbium-doped optical amplifiers Er^{3+} with the aim of proposing optimizations. So, the equation of gain found in this thesis, we have found that the parameters directly influencing the gain such that is: $N_2, N_1, \lambda_s, \Gamma_p, \Gamma_s$ and L_0 . They are evaluated by means of an amplifier simulation code which we have adapted from the relative data of the equation of evolution of the gain in an erbium-doped fiber. The results of the experimental measurements, compared to those of the simulations, are commented and analyzed.

Key words: Optical fibers, erbium, optical amplifiers, gain, optimization.