

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR  
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MENTOURI DE CONSTANTINE  
FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIEUR  
DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE

N° d'Ordre :.....

Série :.....

**MEMOIRE DE MAGISTER**

**Présenté Par**

**Mr. GHOUMAZI MEHDI**

**Option : optique**

**THEME**

**OPTIMISATION DES PERFORMANCES  
D'UNE FIBRE OPTIQUE DOPEE  
A L'ERBIUM**

*Soutenu le : 10 /06 /2009*

Examiné Par le Jury :

Président : F.MANSOUR

Professeur Université Mentouri de Constantine

Rapporteur : M.REMRAM

Professeur Université Mentouri de Constantine

Examineur : T.BOUCHEMAT

Professeur Université Mentouri de Constantine

Examineur : A.CHAABI

Professeur Université Mentouri de Constantine

Année 2008/2009

## *Remerciements*

Après la finition de ce travail je tiens à présenter mes sincères remerciements à ALLAH qui m'a donné la force et la volonté à fin de réaliser ce mémoire.

Je tiens à remercier profondément mon encadreur : le professeur MOHAMED REMRAM pour la confiance qu'il m'a accordée, ses encouragements, et ses précieux conseils.

Je suis honoré que madame FARIDA MANSOUR professeur à l'université Mentouri de Constantine de ait accepté de présider mon jury.

Je tiens à remercier Madame THOURAIA BOUCHEMAT et Monsieur A.HAFID CHAABI professeurs à l'université Mentouri de Constantine, d'avoir examiné mon travail.

Je tiens à exprimer mes vifs remerciements à tous les amis que j'ai côtoyé pendant mon cursus sans oublier l'ensemble des enseignants ayant contribué de près ou de loin à ma formation ainsi que tous les membres du laboratoire LEMEAMED pour leur sympathie, pour l'ambiance qu'ils mettaient au labo, pour leur soutien et pour toutes les discussions fructueuses qui ont enrichi ce travail.

Merci encore une fois

# Sommaire

## Chapitre I : Etude de la structure d'une fibre optique conventionnelle

<b>I</b> Introduction.....	(3)
<b>I-1-L</b> 'histoire de la fibre optique .....	(3)
<b>II</b> Fabrication d'une fibre optique.....	(4)
<b>II 1</b> Fabrication de la préforme par la méthode CVD (dépôt chimique en phase vapeur)..	(4)
<b>III</b> Structure d'une fibre optique .....	(7)
<b>III 1-Lois</b> de descartes et la réflexion interne totale.....	(9)
<b>IV</b> Types de fibres optiques.....	(10)
<b>IV-1- Fibres</b> monomodes.....	(10)
<b>IV-2</b> La Fibre multi mode .....	(11)
<b>IV-2-1</b> Fibres à saut d'indice.....	(11)
<b>IV-2-2</b> Fibres à gradient d'indice.....	(13)
<b>V</b> L'atténuation .....	(13)
<b>VI</b> Le Multiplexage en longueurs d'onde (WDM) .....	(16)
<b>VII</b> Les applications et les avantages de la fibre optique.....	(18)
<b>VIII</b> Conclusion.....	(19)

# **Chapitre II : Principe de l'amplification par fibre optique dopée à l'Erbium**

<b>I</b>	Introduction.....	(20)
<b>II</b>	Principes Physiques.....	(20)
<b>II 1</b>	Les transitions électroniques .....	(20)
<b>II 2</b>	Les transitions radiatives.....	(21)
<b>II 2.1</b>	L'Absorption.....	(21)
<b>II 2.2</b>	L'émission.....	(22)
<b>II 2.2.1</b>	Emission Spontanée.....	(22)
<b>II 2.2.2</b>	Emission Stimulée.....	(23)
<b>II.3</b>	Les transitions non radiatives.....	(24)
<b>II.3.1</b>	Les transferts d'énergie.....	(26)
<b>III</b>	l'ion Erbium.....	(29)
<b>III.1</b>	La luminescence Erbium .....	(29)
<b>III.2</b>	Largeur des transitions optiques.....	(32)
<b>IV</b>	Principes de l'amplification optique.....	(34)
<b>IV 1</b>	Les différentes bandes d'amplification.....	(34)

V Amplificateur Optique.....	(35)
------------------------------	------

V.1 Principe d'un système à trois niveaux.....	( 35)
--	-------

VI Conclusion .....	(36)
---------------------	------

## **Chapitre III : Modélisation d'une fibre optique dopée Erbium**

I Introduction .....	(37)
----------------------	------

II Descriptif du model .....	(37)
------------------------------	------

II 1 Propriétés de l'Erbium dans une EDFA .....	(38)
---	------

II 2 Pompage optique des EDFA .....	(39)
-------------------------------------	------

III La Modélisation de l'amplification optique .....	(41)
--	------

IV Résultats et interprétations .....	(44)
---------------------------------------	------

IV.1 la Variation des équations de populations des trois premiers niveaux énergétiques $N_1$ , $N_2$ et $N_3$ en fonction du temps.....	(45)
---	------

IV.2 la Variation des équations de populations des trois premiers niveaux énergétiques $N_1$ , $N_2$ et $N_3$ en fonction de la puissance de la pompe ( $P_p$ ).....	(50)
--	------

IV.3 La Variation du gain en fonction de la puissance de la pompe.....	(54)
--	------

V Conclusion.....	(57)
-------------------	------

# *Introduction Générale*

## Introduction générale

Depuis quelques années, la fibre optique, après avoir supplanté le câble coaxial, est devenue un des moyens les plus utilisés pour transporter tous types de données (audio, vidéo, Internet). Ce choix est dû en particulier aux efforts soutenus des chercheurs dans le domaine des télécommunications optiques. Jusqu'au début des années 1990, 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 le dépassement de ces débits dès le milieu des années 1990.

Cependant les EDFA fonctionnent dans la troisième fenêtre des télécommunications optiques (autour de 1,55  $\mu\text{m}$ , longueur d'onde qui coïncide avec le minimum d'atténuation des fibres) alors que la plupart des réseaux installés sont constitués de fibres monomodes optimisées à 1,3  $\mu\text{m}$ . La mise en oeuvre 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  $\mu\text{m}$ .

Un avantage des EDFA est le fait qu'elles présentent une bande spectrale d'amplification de 30 à 40 nm. Il est donc possible d'amplifier simultanément plusieurs canaux de longueurs d'onde voisins 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 et l'ordre des modules d'amplification et de compensation de dispersion chromatique au sein de la ligne posent des problèmes d'optimisation en terme de qualité de réception des signaux transportés. En effet la dégradation du signal varie selon le type de compensation utilisée (pré, post ou symétrique). En outre, le besoin de limiter les coûts de production, l'encombrement et

le poids des lignes a suscité l'intérêt de développer une fibre optique capable de réaliser à la fois les fonctions d'amplification et de compensation de dispersion.

Actuellement, le développement d'amplificateurs optiques compacts appropriés pour l'intégration devient un challenge dans le secteur de l'optique intégrée. Avec leur petite taille et leur production massive, les guides d'onde amplificateurs optiques de courte longueur sont moins coûteux, et il est possible de les intégrer avec des fonctions passives sur un même substrat.

Dans cette optique s'intègre notre contribution. Notre travail est basé sur l'optimisation des performances d'une fibre optique en particulier la concentration de l'erbium ainsi que la puissance de la pompe, utilisées pour obtenir le meilleur gain.

Nous débuterons ce manuscrit par décrire la fibre optique et les techniques utilisées pour sa fabrication, ainsi que les différents types de la fibre, Nous aborderons de même, Le phénomène de l'atténuation et les différentes pertes causées par une fibre optique. Dans la dernière partie de ce chapitre, nous parlerons de l'application et des avantages de la fibre optique.

Dans le deuxième chapitre on abordera les mécanismes de relaxation, les transitions radiatives et les transitions non radiatives, ainsi que l'environnement des ions Er dans la fibre optique. Nous allons aussi exposé les principes de l'amplification optique, et nous terminons par donner le principe d'un système d'amplification à trois niveaux, crée par le dopage d'une matrice de silicate par des ions d'erbium.

Dans le dernier chapitre, nous présentons le modèle utilisé dans notre travail. Pour décrire les variations de populations des trois premiers niveaux énergétiques  $N_1$ ,  $N_2$  et  $N_3$  en fonction du temps et de la puissance de la pompe. Nous concluons ce chapitre par l'étude du gain en fonction de la puissance de la pompe.

Une conclusion de notre travail est présentée en dernier.



# Chapitre I

*Etude de la structure  
d'une fibre optique  
conventionnelle*

**I- Introduction :**

Dans ce chapitre nous commençons par un aperçu théorique sur la fibre optique et sa fabrication. Pour cela, nous présentons une technique de fabrication de la préforme par la méthode CVD (dépôt chimique en phase vapeur), ainsi que son étirage. Nous présentons ensuite le cadre théorique concernant les lois de Descartes et la réflexion interne totale, en passant par les différents types de fibres existantes : monomodes et multi mode à saut d'indice et à gradient d'indice, une attention sera donnée à l'atténuation et les différentes pertes causées. Le multiplexage en longueurs d'onde (WDM : Le Wavelength Division Multiplexing) sera présenté.

**I-1L'histoire de la fibre optique :**

En 1854, le physicien irlandais Tyndall a fait une première démonstration scientifique de ce phénomène dont l'expérience consistait à guider la lumière du soleil dans un jet d'eau.

Et en 1950, La première application fructueuse de la fibre optique a eut lieu avec le fibroscope flexible, permettant de transmettre une image le long d'une fibre de verre. Il fut particulièrement utilisé en endoscopie pour observer le corps humain. Cependant, la mauvaise qualité des fibres ne permettait pas de transmettre la lumière sur une longue distance.

A partir de 1970 les télécommunications par fibre optique ne furent possibles qu'après l'invention du laser et les fibres commencèrent à remplacer les fils de cuivre jusque là utilisés, grâce à la fabrication par trois scientifiques de la société Corning Glass Works de la première fibre avec des pertes acceptables (20 dB/km). Cette fibre était en mesure de transporter 65 000 fois plus d'information que le simple fil de cuivre traditionnel. L'avantage des fibres optiques sur les fils de cuivre est énorme. Tout d'abord, les fibres permettent de transporter une grande quantité d'information en même temps, grâce à une grande largeur de bande. De plus, le signal est beaucoup moins atténué (~100 fois moins), ce qui permet de limiter le nombre de répéteurs.

Et depuis les années 1980, la structure de ces fibres est très simple : un cylindre en silice dont le coeur est dopé avec un oxyde de germanium. Les dimensions d'une fibre sont comparables à celles d'un cheveu.

Enfin, les fibres optiques ne demandent pas d'entretien particulier et ont une très bonne durabilité chimique, alors que les fils de cuivre se dégradent vite à cause de la corrosion. Aujourd'hui, 80% des communications à longue distance se font par le réseau de fibres optiques [1].

## **II Fabrication d'une fibre optique :**

Elle est réalisée par « oxydation en phase vapeur », et obtenu de la silice qui est un composé oxygéné du silicium, de formule  $\text{SiO}_2$ , présent dans un grand nombre de minéraux, tels que le quartz, la calcédoine et l'opale.

### **II-1 Fabrication de la préforme par la méthode CVD (dépôt chimique en phase vapeur) :**

Il existe un grand nombre de processus pour concevoir une préforme, des internes comme la méthode PCVD (Plasma Chemical Vapor Deposition), ou externes comme la méthode VAD (Vapor Axial Deposition). Cependant, nous allons seulement nous intéresser à un procédé interne appelé PCVD car c'est une technique utilisée aussi pour réaliser la plupart des préformes.

Ce processus de fabrication de préforme nécessite de réaliser deux étapes distinctes qui sont le dépôt puis le rétreint. La technique est décrite pour le cas d'une préforme classique (figure (I-1)).

La réalisation d'une préforme s'effectue à partir d'un tube de silice de haute pureté qui ne contient par conséquent que quelques ppm d'ions  $\text{OH}^-$  (1 ppm correspond à  $0,8 \times 10^{22} \text{ m}^{-3}$ ). Celui-ci est monté sur un tour verrier, puis mis en rotation. Il est à noter que ce tube forme la gaine optique « support » de la fibre.

A l'une des extrémités du tube, on injecte un mélange gazeux constitué d'halogénures et d'oxygène et on chauffe à haute température (1400 à 1600 C°) au moyen d'un chalumeau oxyhydrique qui se déplace le long du tube, à la vitesse de quelques dizaines de centimètres à la minute, permettant d'activer la réaction d'oxydation des halogénures. L'opération donne lieu à la

formation et au dépôt de suie de silice par couches successives de 5 à 10  $\mu\text{m}$  d'épaisseur. Au passage du chalumeau sur les suies, le dépôt est vitrifié.

Une fois le dépôt terminé, on stoppe l'injection de gaz. Cependant, un trou central subsiste à l'intérieur de la préforme. On augmente donc la température de chauffage jusqu'à atteindre la température de 2000°, ce qui provoque un ramollissement de la silice suffisant pour permettre un rétreint homogène, grâce aux forces dues aux tensions superficielles

**- Etirage de la préforme :**

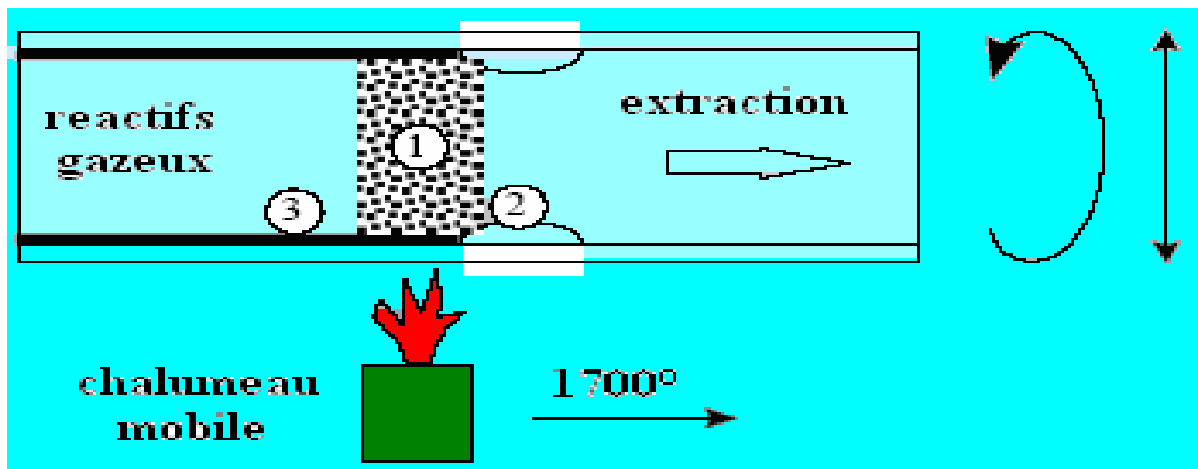
Une fois la préforme réalisée, la seconde étape consiste à réaliser une fibre optique à partir de celle-ci. Cette opération est effectuée grâce à une tour de fibrage.

La préforme est tout d'abord introduite dans un four à induction afin de chauffer sa partie inférieure à une température proche de sa température de fusion (aux alentours de 1800°). La préforme commence à se ramollir et il se forme une goutte de silice. Cette goutte descend par gravité, entraînant un fil de silice, à l'intérieur d'un tube en surpression d'argon afin de protéger la silice des impuretés et de l'humidité. Puis la fibre est enduite d'une résine de protection immédiatement polymérisée par un rayonnement ultraviolet. La fibre est terminée, il ne reste plus qu'à l'enrouler sur un tambour précédé d'un cabestan dont la vitesse de rotation est asservie par un système de contrôle du diamètre.

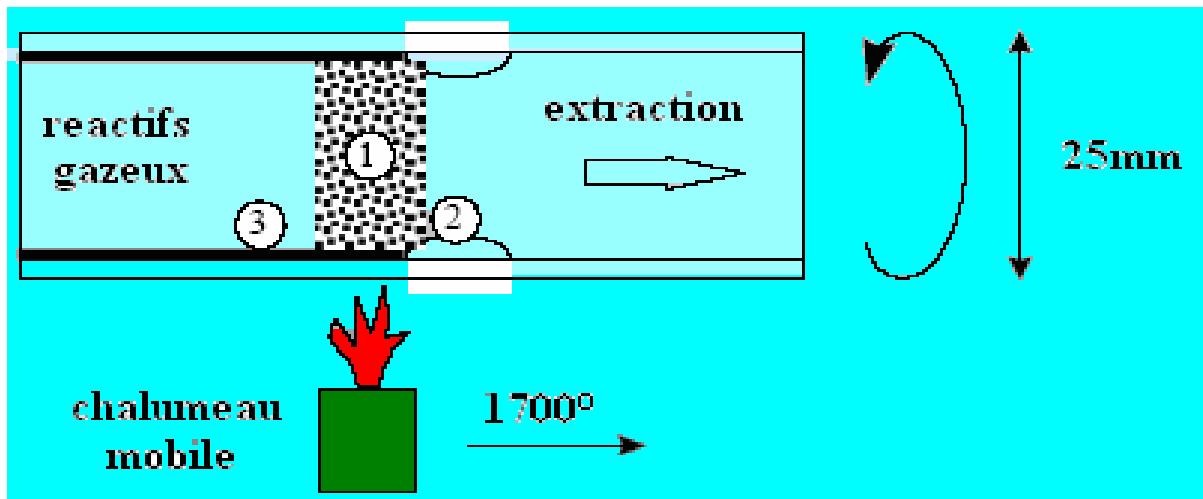
Comme nous l'avons déjà vu, la fibre optique est une homothétie de la préforme dont l'équation de fibrage est la suivante :

$$v \cdot d^2 = V \cdot D^2 \quad (\text{I-1})$$

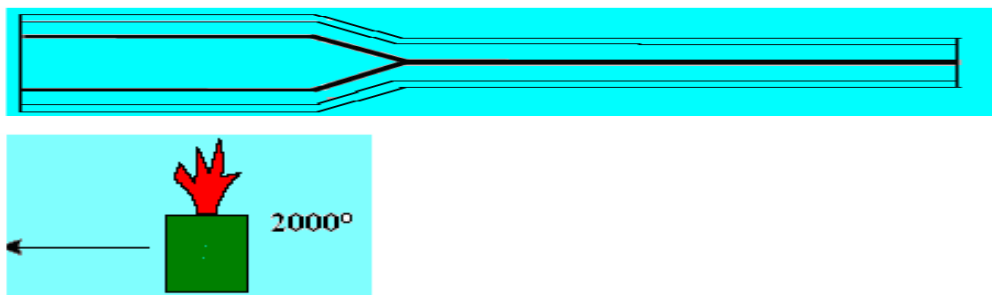
Avec  $v$ ,  $V$ , vitesses respectivement d'enroulement de la fibre et de descente de la préforme et  $d$ ,  $D$ , respectivement diamètres de la fibre et de la préforme.



a)- Dépôt du cœur



b)- Dépôt de la gaine



c)-Retreint

Figure (I-1) : Fabrication d'une préforme par la méthode CVD [2].

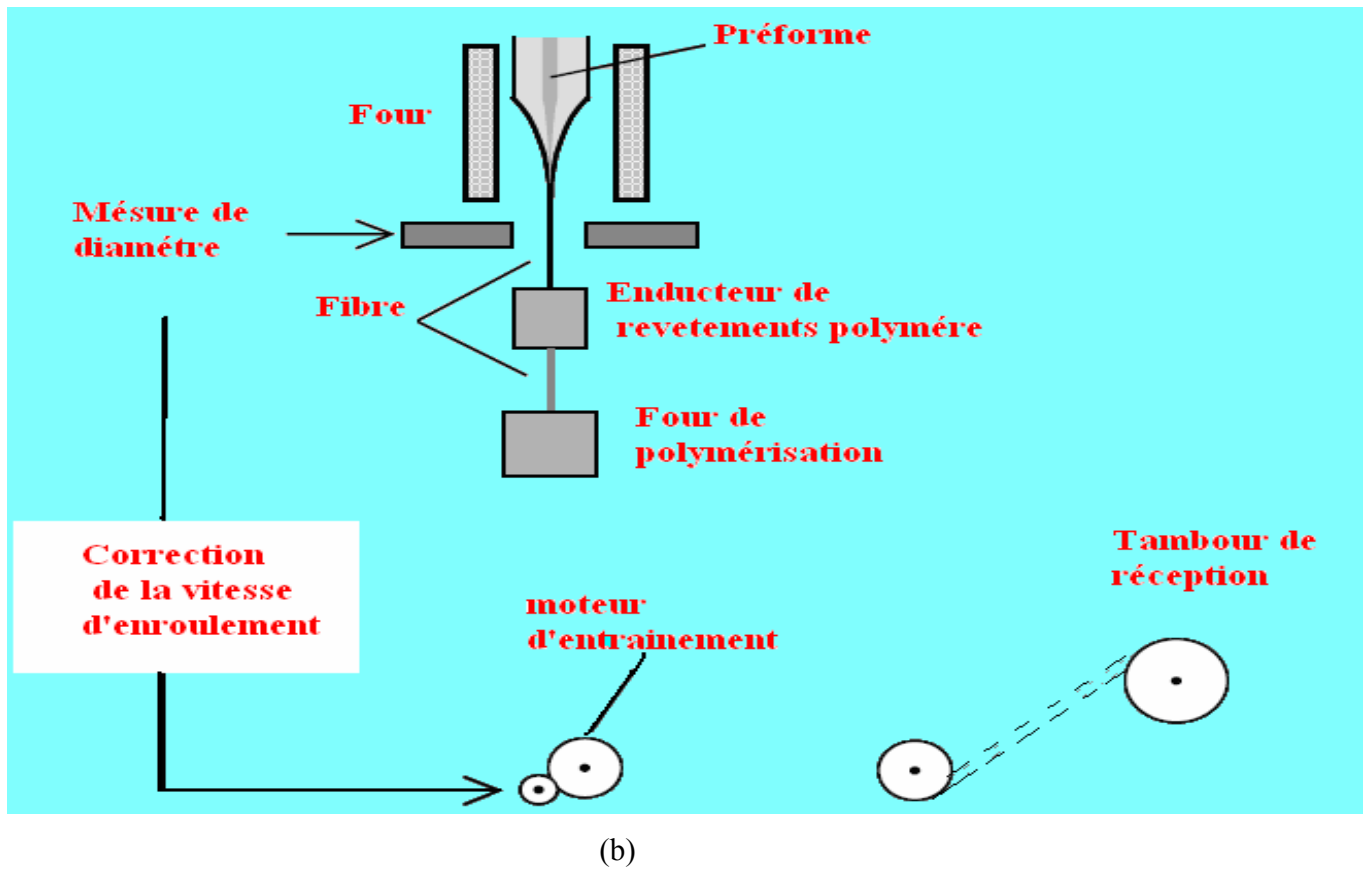


Figure (I-2) : Schéma d'une tour de fibrage.

### III Structure d'une fibre optique :

La fibre optique la plus simple est obtenue à partir d'un tube et d'une barre de verre montés concentriquement de matériaux diélectriques (silice, plastique) d'indices de réfraction différents. L'ensemble est chauffé pour assurer l'homogénéité. Alors il suffit d'un barreau de verre d'un mètre de longueur et de 10cm de diamètre pour obtenir une fibre monomode de 150km de longueur. Au final, le diamètre de la fibre est d'environ 10 $\mu$ m et le cœur d'indice  $n_1$  est placé au centre d'une gaine optique d'indice  $n_2$  ( $n_2 < n_1$ ) appelée « manteau » (cladding). Par ailleurs cette gaine en verre et de protection extérieure, permet un meilleur vieillissement (contrainte

mécanique, humidité ...) [3], et elle est à son tour enrobée d'un revêtement de protection (230  $\mu\text{m}$ ) (figure (I-3)). Le câble final peut être composé d'un ou de plusieurs brins [4].

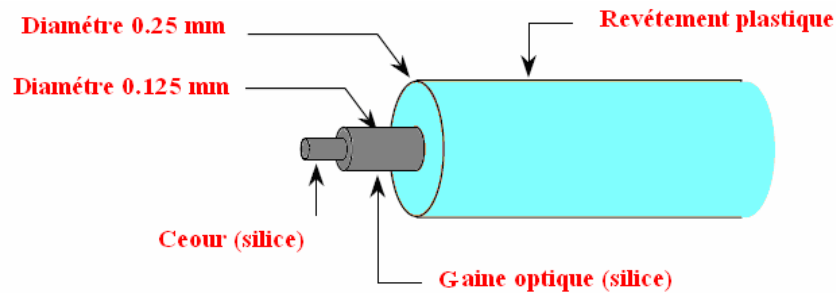


Figure (I-3): Constitution d'une fibre

On appelle profil d'indice la variation de l'indice de réfraction suivant une coupe transversale de la partie optique de la fibre. Les deux types de profil couramment utilisés sont les profils à saut d'indice et à gradient d'indice [3].

Quelques grandeurs :

-La valeur des indices pour une fibre silice : 1,45

-Écart entre les indices :

$$\Delta n = \frac{n(\text{cœur})_{\text{max}} - n(\text{gaine})}{n_{\text{Cœur}}} \quad (\text{I-2})$$

Approximativement égal à 1%

-Dimension du cœur : 5 à 50  $\mu\text{m}$ .

- Dimension de la gaine : 125 à 500  $\mu\text{m}$ .

Le signal lumineux est propagé dans et à proximité du cœur et la gaine optique sert essentiellement à amener le diamètre à 125 $\mu\text{m}$ , pour des raisons mécaniques et le revêtement sert à protéger la fibre optique [5].

### **III-1 Lois de Descartes et la réflexion interne totale :**

Du fait du dopage du coeur avec un oxyde de germanium, l'indice de réfraction du coeur est supérieur à celui de la gaine. Le phénomène de réflexion interne totale repose sur une différence d'indices de réfraction et les lois de Descartes ( $n_2 \sin i_2 = n_1 \sin i_1$ ). Les angles sont mesurés par rapport à la normale à l'interface. Dans le cas d'un angle d'incidence  $i_1$  faible, la loi de Descartes permet de conclure qu'une partie de l'onde incidente est transmise, et traverse l'interface. On peut alors calculer un angle critique  $i_1^{cr}$  pour lequel l'onde transmise vérifie :  $i_2 = \frac{\pi}{2}$  (figure 4-a).

Dans le cas d'un angle incident  $i_1$  plus grand que l'angle critique  $i_1^{cr}$ , on observe alors une réflexion totale car aucune onde ne peut être transmise dans la gaine. Ce phénomène est la réflexion interne totale (figure (I-4-b)) [2].

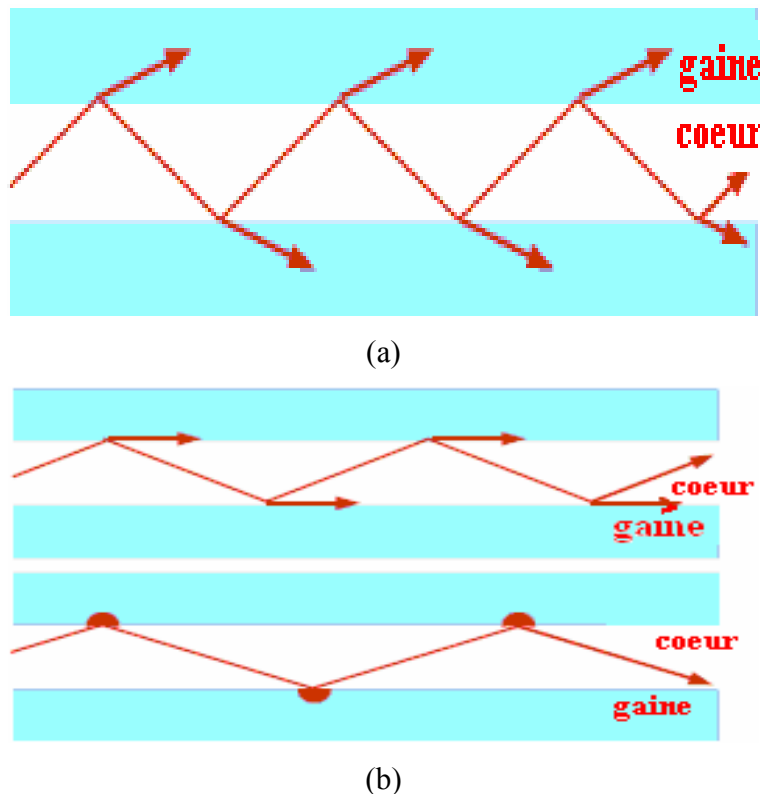


Figure (I-4 : a, b) : Réflexions dans une fibre



**IV Types de fibres optiques :****IV-1 Fibres monomodes :**

Une fibre monomode (silice dopée) d'où le coeur est proche de la longueur d'onde (coeur  $\approx \lambda$ ) donc la propagation est rectiligne de la lumière, au centre .

Les fibres optiques sont des guides d'ondes ou la propagation des signaux lumineux se décrit au moyen de modes de propagation, chaque mode étant une solution spécifique de l'équation d'onde [6], donnée par l'équation suivante :

$$\nabla \Lambda (\nabla \Lambda E) + \varepsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = 0 \quad (\text{I-3})$$

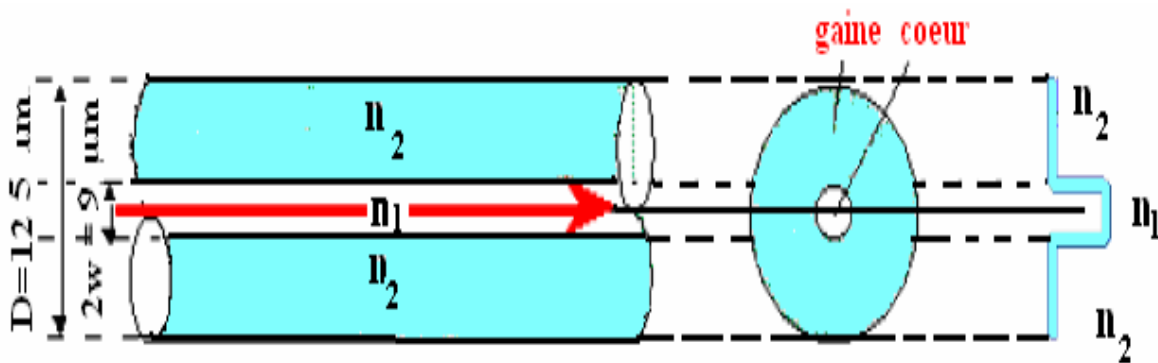


Figure (I-5) : Topologie d'une fibre optique monomode

Cette onde électromagnétique est une onde lumineuse composée des champs électrique et magnétique E et H, qui sont liées par les équations de Maxwell., elle se propage à la vitesse de la lumière dans l'espace libre  $c^2 = \frac{1}{\mu_0 \varepsilon_0} = 3 * 10^8$  m/s et dans le milieu.

On peut donc représenter l'onde par un seul de ces champs, en générale le champ électrique.

Et par conséquent l'équation d'onde pour le champ électrique s'écrit :

$$\nabla^2 E - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = 0 \quad (\text{I-4})$$

De façon similaire on trouve pour le champ magnétique :

$$\nabla^2 H - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 H}{\partial t^2} = 0 \quad (\text{I-5})$$

$$\text{Ou } c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}$$

$$v = \frac{c}{n} \Rightarrow \lambda = \frac{c}{nf} \quad (\text{I-6})$$

Et d'après la loi de Snell Descartes décrite précédemment il y a réflexion totale si  $n_2 < n_1$ , car le rayon s'écarte de la normale et si  $\theta_1 > \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right)$ .

Une caractéristique essentielle au niveau des télécommunications c'est la propagation monomode.

#### **IV-2 la Fibre multi mode :**

La fibre multi mode a été la première utilisée. Elle est facile à utiliser (gros cœur ~ tolérances élevées) mais a une limitation intrinsèque de bande passante. En plus elle est la plus employée pour les réseaux privés.

Dans cette famille de fibre, nous trouvons deux sous catégories :

##### **IV 2-1 Fibres à saut d'indice :**

C'est le passage abrupte du cœur vers la gaine qui définit les fibres à saut d'indice.

Le principe de fonctionnement de la fibre est basé sur la réflexion totale interne [1]. Notant  $n_f$  et  $n_g$ , les indices du cœur et de la gaine de la fibre respectivement, alors la condition de réflexion totale interne telle qu'elle est décrite précédemment est:

$$|\sin(i_1)| \geq \frac{n_g}{n_f} \tag{I-7}$$

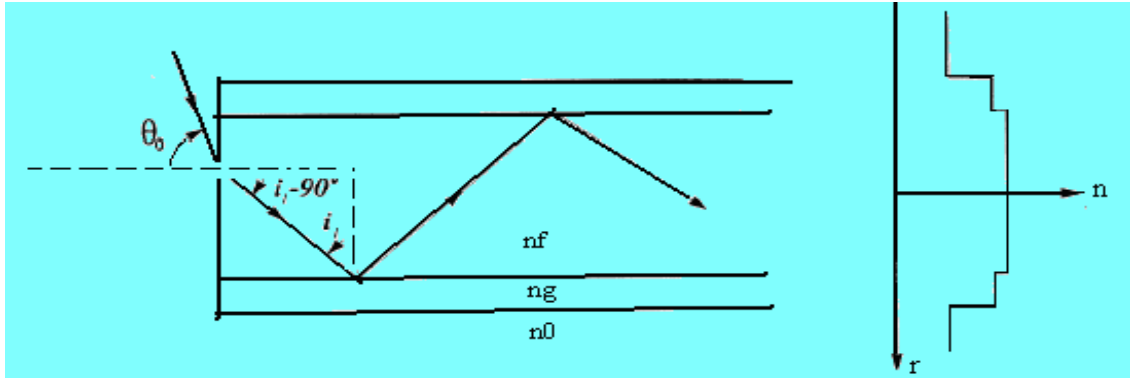


Figure (I-6) : Fibre à saut d'indice

La loi de Snell-Descartes, permet d'établir facilement la restriction suivante, qui s'applique à l'angle d'incidence  $\theta_0$  sur le bout de la fibre, pour que la lumière injectée dans celle-ci y reste confinée:

$$|n_0 \sin(\theta_0)| \leq (n_f^2 - n_g^2)^{1/2} \tag{I-8}$$

$n_0$  : L'indice du milieu dans lequel baigne la fibre

$\text{MAX}(n_0 \cdot \sin(\theta_0))$  : "Ouverture numérique" (O.N.)

Ce qui donne :

$$\text{ON} = (n_f^2 - n_g^2)^{1/2} \tag{I-9}$$

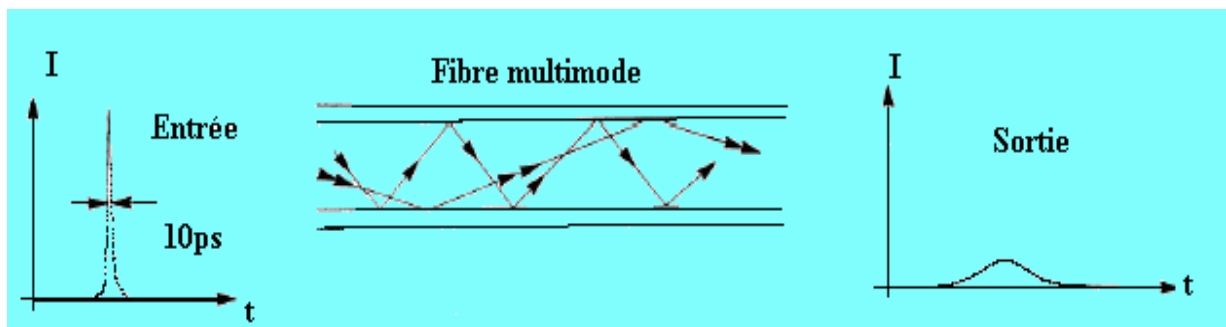


Figure (I-7): Fibre multi mode à saut d'indice.

#### **IV 2-2 Fibres à gradient d'indice :**

L'indice de réfraction coeur/gaine présente une courbe parabolique avec un maximum au niveau de l'axe. Les rayons lumineux suivent un parcours sinusoïdal. Les diamètres les plus fréquents sont  $62.5\mu\text{m}$  et  $50\mu\text{m}$ .

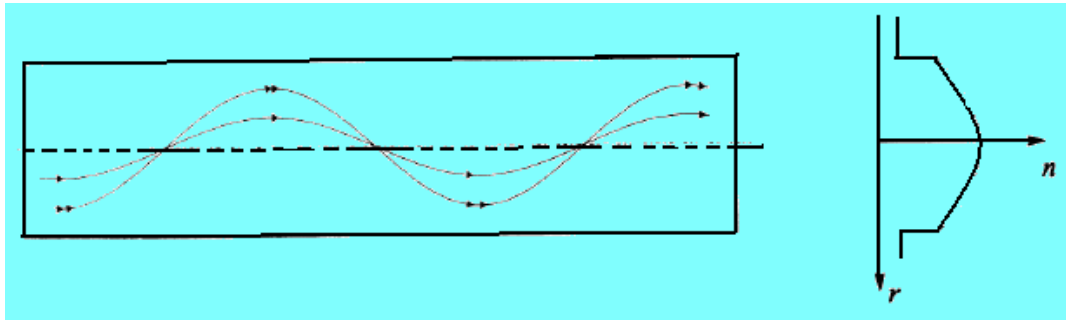


Figure (I-8) : Fibre à gradient d'indice

Car elles ont une capacité de transmission de données beaucoup plus élevée que les fibres à saut d'indice: 100 Mbits/s sur une distance de 100 km. La première génération de systèmes de télécommunications optiques à grande distance était basée sur des fibres à gradient d'indice.

#### **V L'atténuation:**

L'atténuation c'est une partie du signal, sous forme de lumière, perdue.

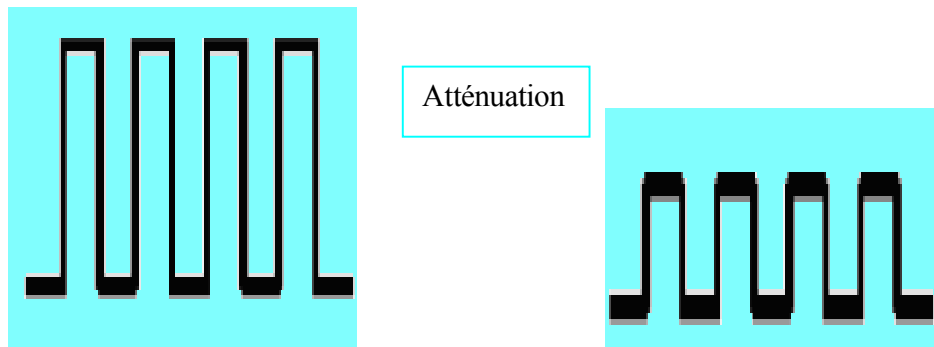
Ce signal qui se propage dans la fibre optique à une puissance qui s'affaiblit exponentiellement en fonction de la distance de propagation

$$p(z) = p_{in} \cdot e^{-\alpha z} \quad (\text{I-10})$$

$\alpha$  (Neper/m) : coefficient d'atténuation et elle s'exprime par (dB/km).

$$A = \frac{10}{L} \log \left( \frac{p_{in}}{p_{out}} \right) \quad (\text{I-11})$$

$$\text{Relation entre } A \text{ et } \alpha : A_{db/km} = 4,34 \cdot 10^3 \alpha_m^{-1} \quad (\text{I-12})$$



Le signal qui se propage s'affaiblit

Figure (I-9):L'effet de l'atténuation [3].

Les causes de l'atténuation sur les fibres optiques sont plusieurs :

-Aux basses longueurs d'onde ( $\lambda = 1,8 \mu\text{m}$ ). Une augmentation très rapide des pertes qui a été provoqué par l'absorption intrinsèque du matériaux constitutif .En plus la présence d'impuretés (la plus forte c'est l'ion  $\text{OH}^-$  à  $\lambda = 1,39 \mu\text{m}$ ) mènes une résonance en créant des diverses bandes d'absorptions.

-la combinaison de l'absorption intrinsèque multi phones et de l'effet Rayleigh, conduit à un minimum théorique d'atténuation de 0.14 db/km à  $\lambda=1.55\mu\text{m}$ .et les pertes par diffusion est provoqué par les irrégularités involontaires de structure.

-L'effet Rayleigh, dû aux fluctuations de composition dans le verre (d'origine thermodynamique), est inévitable. Il provoque une montée en  $\lambda^{-4}$  de l'atténuation aux courtes longueurs d'ondes

Les télécommunications dépendent directement des caractéristiques de cette fibre de silice. L'atténuation en dB/Km est représentée ci-dessous pour cette fibre en fonction de la longueur d'onde.

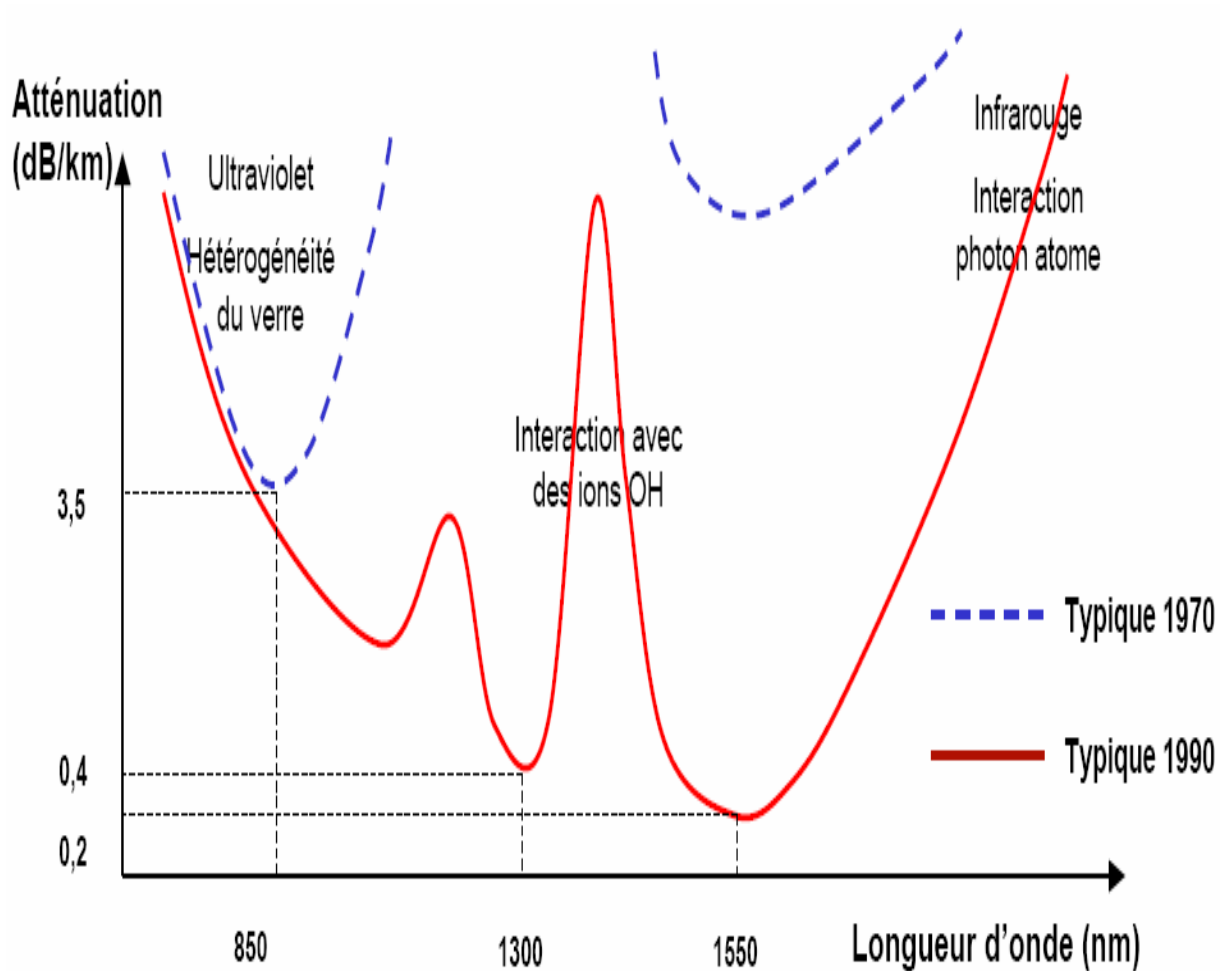


Figure (I-10): la bande de fréquence utilisable [3].

On voit les trois fenêtres de prédiction des télécommunications par fibre optique

- La région des 800nm.
- La région des 1330 nm.
- La région des 1550 nm.

Ces fenêtres sont séparées par des pics d'absorptions provenant des ions OH<sup>-</sup> qui proviennent des molécules d'eau intervenant lors de la fabrication de la fibre.

Les fibres peuvent être utilisées pour la transmission essentiellement dans deux fenêtres en longueur d'onde, qui correspond à la fenêtre du minimum d'atténuation :

- La « fenêtre à 1300 nm » qui a une largeur de bande de 50 nm et une atténuation moyenne d'environ 0,4 dB/km.

- La « fenêtre à 1550 nm » qui a une largeur de bande de 100 nm et une atténuation moyenne d'environ 0,2 dB/km.

Les composants optoélectroniques (lasers et récepteurs) sont peu coûteux à cette gamme des longueurs d'onde (1300nm) et qui présente une atténuation importante. Cette fenêtre est utilisée pour les systèmes de télécommunications de courte portée (quelques dizaines de kilomètres) ou de faible capacité : boucles locales à fibres optiques, réseaux urbains, LANs.

Une utilisation universelle pour les télécommunications de longues distances et à haut débit, grâce à la faible atténuation dans la fenêtre de [1550nm], elle permet d'espacer bien davantage les coûteux régénérateurs et/ou amplificateurs nécessaires pour la compensation de l'atténuation dans la fibre de ligne. D'où l'intérêt pour les amplificateur optiques à base de fibre optique dopée Erbium ; thème de notre présente thèse.

## **VI -Le Multiplexage en longueurs d'onde (WDM) .**

Afin de pouvoir exploiter au mieux l'énorme bande passante de la fibre optique une technique WDM (Wavelength Division Multiplexing), appelé « gâteau » a été développée pour le multiplexage en longueur d'onde. En WDM, le « gâteau » de la bande passante est divisé en «tranches», et dans chacune de ces tranches, on insère une longueur d'onde ou « couleur » qui porte un signal binaire. Dans la fibre toutes les couleurs sont transmises ensemble (multiplexées optiquement). En réception, les couleurs utilisées sont séparé par des filtres optiques, puis une démodulation individuellement pour chaque couleur pour en extraire sa capacité.

L'espacement entre deux « tranches du gâteau » ou entre couleurs dépend des techniques de transmission et de filtrage. La capacité transmise est directement liée à la taille de la couleur

(largeur de la « tranche du gâteau »). plus la capacité est grande, plus la tranche doit être large : une tranche de 12,5 GHz, un dixième de nanomètre, ne saurait contenir plus de 12,5 Gbit/s).

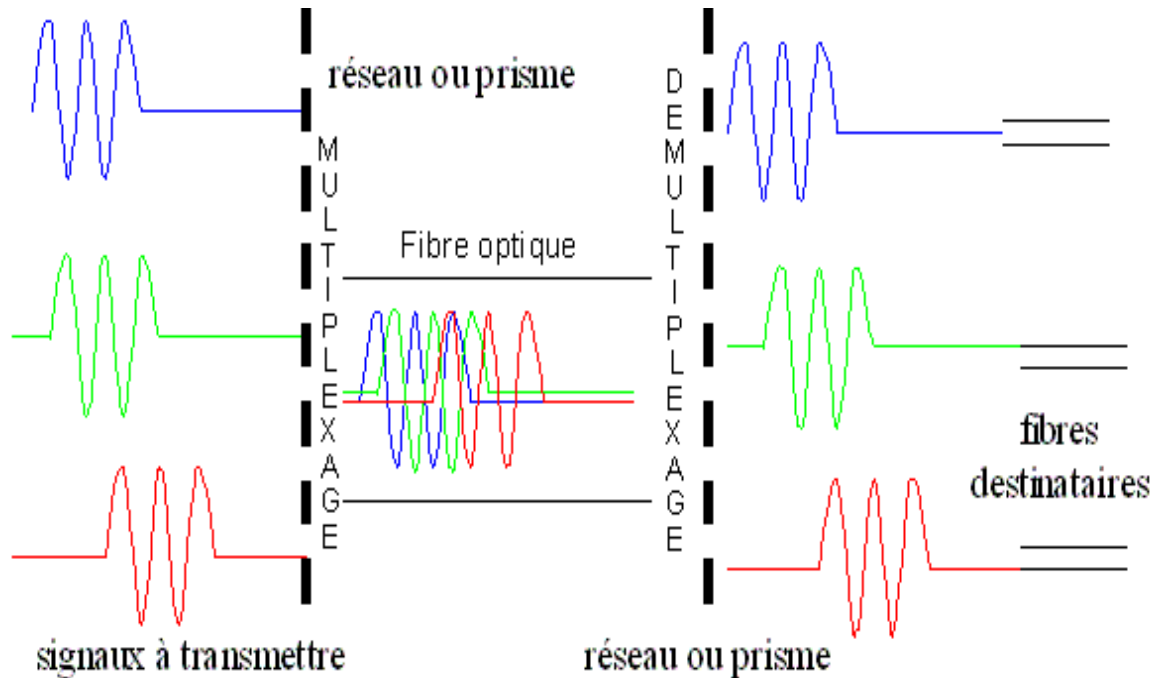


Figure (I-11): Principe du multiplexage.

Il existe 3 techniques de multiplexage :

- Le multiplexage fréquentiel : chaque signal lui ai affecté une bande passante particulière en s'assurant qu'aucune bande passante de voie basse vitesse ne se chevauche.

- Le multiplexage temporel : partagé dans le temps l'utilisation de la voie haute vitesse en l'attribuant successivement aux différentes voies basse vitesse même s'il n'y a aucun signal à émettre.

- Le multiplexage statique : basé sur le multiplexage temporel, il lui attribue la voie haute vitesse qu'aux voies basse vitesse qui ont effectivement quelque chose à transmettre [9].

En ce moment, une activité de recherche très intense est suscité par les techniques de multiplexage est basée sur l'envoi de plusieurs longueurs d'ondes dans une même fibre. Ce principe paraît simple au premier abord, mais elle est délicate sa réalisation en pratique, est pour



cela il faut considérer qu'elle sera différente la dispersion intra modale pour chacune des longueurs d'ondes utilisées. L'injection des plusieurs faisceaux simultanément dans une même fibre et à la séparation de ces faisceaux à la sortie de la fibre, nécessite l'utilisation des différents moyens tout en minimisant les interactions entre les différents faisceaux [3].

L'intérêt de la fibre optique est que ces signaux ne peuvent se confondre, à la réception ils seront parfaitement distingués. La réalisation de multiplexage est principalement dans des fibres monomodes.

Le multiplexage est ainsi une technologie incontournable des télécommunications par fibre optique [7]. Divers laboratoires ont démontré la possibilité de transmettre plus de vingt longueurs d'onde à plusieurs dizaines de Gbits/s sur 10 000 km, et des systèmes expérimentaux à plus de 1 téraoctets/s, utilisant jusqu'à 160 longueurs d'onde, sont présentement testés [3].

## **VII- Les applications et les avantages de la fibre optique:**

A la fin des années 90, Le secteur des télécommunications a connaît une croissance rapide et la capacité de transmission doublait à chaque année, est qui mène vers un plafonnement des performances des réseaux commerciaux, qui est le résultat d'une tendance à la saturation de la demande [6]. La plupart des technologies nécessaires au déploiement d'une infrastructure "tout optique" sont aujourd'hui disponibles : la fibre optique, de plus en plus performante en bande passante, le multiplexage en longueurs d'onde WDM, DWDM , l'insertion/extraction de longueurs d'onde, les amplificateurs large bande, le brassage optique.

Dans ces conditions, le panorama de l'information aura complètement changé. La téléphonie, la radio, la télévision et les transferts de données "informatiques" seront assurés par la même connexion, les interpénétrations de ces divers moyens d'informations seront beaucoup plus grands, c'est du moins un scénario tout à fait réaliste [8].

Donc établir un réseau de télécommunications par fibre optique fait appel à de nombreuses compétences comme on a pu le voir , et l'optimiser tant au niveau des performances

que du coût demande des évolutions et avancées notables dans des domaines aussi variés que la fabrication , la physique , l'informatique , l'optique ..[9].

### **VIII- Conclusion :**

Cependant malgré le développement des applications des fibres optiques, ce développement reste tributaire, les deux paramètres essentiels, sa bande passante et l'affaiblissement du signal (atténuation) lors de la propagation. D'où l'intérêt à l'étude de l'amplificateur électrique (générateur) ou à l'amplification intégré (fibre dopé à Erbium).

## Chapitre II

*Principe de l'amplification*

*Par fibre optique dopée à*

*l'Erbium*

## **I Introduction :**

En 1985, une équipe de chercheurs a démontré que l'amplification de la lumière dans une fibre optique est possible autour de 1540 nm avec l'ion  $\text{Er}^{+3}$ , cette nouvelle fenêtre d'amplification dans la fibre optique, coïncidant avec une plage de haute transmission des fibres de silice, qui ouvrait la porte à une révolution dans les télécommunications optiques [10], et qui atteint la maturité de sa technologie. Les systèmes de transmission par fibre optique sont les seuls actuellement, capables de répondre par leur capacité élevée à la demande croissante du flux de données et en particulier les applications multimédia grand public [11]. Pour répondre à cette demande en particulier, dans les transmissions à haut débit avec une régénération du signal un système peu encombrant, c'est-à-dire intégré a été proposé, c'est le dopage d'un tronçon de la fibre sur quelque centimètre par des ions d'erbium.

Dans ce chapitre, nous présentons les principes physiques des transmissions électroniques aussi que l'environnement Erbium et son utilisation dans l'amplification optique des signaux propagent dans une fibre à silicate.

## **II Principes Physiques :**

### **II.1 Les transitions électroniques :**

A l'origine du phénomène d'amplification optique se trouve l'interaction des ions terre rare avec un rayonnement électromagnétique. Cette interaction donnera naissance à des transitions entre les différents niveaux d'énergie des ions, qui peuvent être classifiées en deux catégories suivant le fait qu'elles soient accompagnées ou non par l'échange d'un photon (quantum d'énergie lumineuse):

- Transitions radiatives;
- Transitions non radiatives;

Par la suite nous allons passer en revue les principaux mécanismes appartenant à chacune de ces deux catégories de transitions et qui sont susceptibles d'avoir une quelconque influence sur la réalisation de l'amplification optique dans les verres que nous étudions.

Au cours de la propagation dans le matériau, les photons peuvent subir deux importants phénomènes par les ions terres rares : absorption ou émission d'un photon, ce sont donc des

mécanismes radiatifs [12]. En plus nous allons étudier ces mécanismes plus en détail en commençant par :

**II.2 Les transitions radiatives :**

**II.2.1 L'Absorption :**

Soit un rayonnement électromagnétique d'énergie  $E = h\nu$ , traversant un matériau dans lequel sont incorporés des ions de terre rare ; un ion peut absorber un photon et faire passer ses électrons d'un niveau fondamental  $E_1$  vers un niveau excité  $E_2$ , l'écart énergétique  $E_2 - E_1$  correspondant à l'énergie du photon (Figure (II-1)).

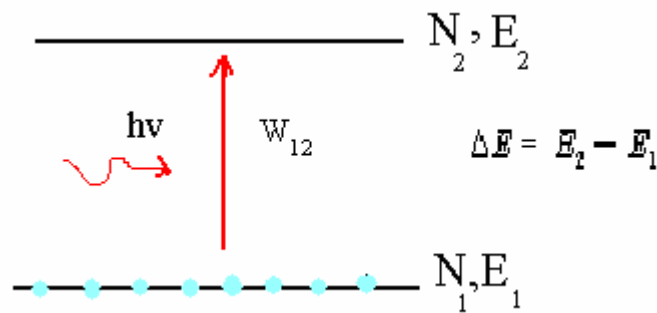


Figure (II-1) – Phénomène d'absorption [13].

Plus l'énergie du photon est proche de l'écart  $\Delta E = E_2 - E_1$ , plus ce processus d'absorption est efficace.

$N_1$  représente la population du niveau fondamental, et  $N_2$  la population du niveau excité, en ion par  $\text{cm}^3$ . On peut alors écrire la variation de population des niveaux suivant la relation [13] :

$$\frac{dN_1}{dt} = -\beta_{12}\rho(\nu)N_1 = -\frac{dN_2}{dt} \tag{II-1}$$

Avec  $\beta_{12}$  le coefficient d'Einstein et  $\rho(\nu)$  la densité d'énergie en fonction de la fréquence du faisceau incident. On définit la probabilité de transition  $w_{12}$  en  $\text{s}^{-1}$  telle que :

$$w_{12} = \beta_{12}\rho(\nu) \tag{II-2}$$

$w_{12}$  Peut aussi s'écrire en fonction de la section efficace d'absorption  $\sigma_{12}$  et de l'intensité du faisceau incident  $I$  :

$$w_{12} = \frac{\sigma(\nu)I}{h\nu} \quad (\text{II-3})$$

La section efficace d'absorption  $\sigma_{12}$  est définie comme le coefficient de proportionnalité entre la probabilité d'absorption d'un photon et le nombre d'ions par unité de surface ; elle a les dimensions d'une surface.

Les mesures de section efficace d'absorption peuvent se déduire à partir des enregistrements des spectres d'absorption. Ces mesures sont effectuées à l'aide d'un spectrophotomètre à deux faisceaux. Un faisceau de lumière blanche est envoyé sur un monochromateur afin de sélectionner la longueur d'onde  $\lambda$  puis sépare en deux faisceaux de même intensité ; le faisceau de référence d'intensité  $I_0(\lambda)$  et le faisceau traversant l'échantillon d'intensité  $I(\lambda)$ . Les spectres sont enregistrés à échelle de densité optique  $\rho(\lambda)$  telle que :

$$\rho(\lambda) = \log\left(\frac{I_0(\lambda)}{I(\lambda)}\right) \quad (\text{II-4})$$

On en déduit alors la section efficace d'absorption

$$\sigma(\lambda) = \left(\frac{\rho(\lambda) \ln(10)}{N_1}\right) \quad (\text{II-5})$$

Avec  $N_1$  le nombre d'ions de terre rare par  $\text{cm}^3$ .

### II.2.2 L'émission :

#### II.2.2.1 Emission Spontanée :

Les états stables ne sont pas des états excités, et au bout d'un certain temps l'électron qui se trouve sur un tel état tombe à l'état fondamental en émettant un photon (figure II-2). Il s'agit là du phénomène réciproque au phénomène d'absorption

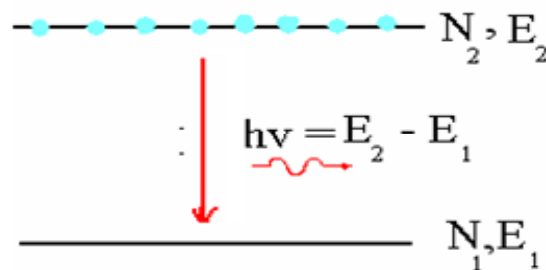


Figure (II-2) : Phénomène d'émission spontanée [13].

La polarisation et la direction du photon émis sont aléatoires, mais son énergie est

$$h\nu = \Delta E = E_2 - E_1 \quad (\text{II-6})$$

La variation de population des ions entre les niveaux d'énergie  $E_1$  et  $E_2$  peut s'écrire :

$$\frac{dN_1}{dt} = A_{21}N_1 = -\frac{dN_2}{dt} \quad (\text{II-7})$$

$A_{21}$  Est le coefficient d'Einstein qui correspond à la probabilité d'émission spontanée par unité de temps. Il s'exprime en  $s^{-1}$  et est inversement proportionnel a la durée de vie radiative du niveau d'énergie  $E_2$

$$A_{21} = \frac{1}{\tau_{rad}} \quad (\text{II-8})$$

Il peut y avoir plusieurs niveaux d'énergie  $E_j$  en dessous du niveau excité  $E_m$ . Les électrons peuvent alors effectuer des transitions spontanées vers chacun de ces niveaux. On peut ainsi définir pour chacune de ces transitions une probabilité d'émission spontanée  $A_{mj}$ . La probabilité totale de désexcitation est la somme de toutes ces probabilités, et la durée de vie radiative est :

$$\tau_{rad} = \frac{1}{\sum_j A_{mj}} \quad (\text{II-9})$$

On définit alors le rapport de branchement  $\beta$  pour une transition donnée m-i par la relation :

$$\beta = \frac{A_{mi}}{\sum_j A_{mj}} \quad (\text{II-10})$$

### **II.2.2 .2 Emission Stimulée:**

La figure (II-3) montre le principe d'un phénomène à 3 particules qui est sous l'impact d'un photon, un électron situé sur le second niveau  $E_2$  est qui se recombine sur  $E_1$  en émettant un nouveau photon qui sera identique au photon incident. Ainsi, ce nouveau photon aura la même : direction, phase et d'énergie (donc la même longueur d'onde) que le photon incident. C'est le phénomène qui est à l'origine de l'amplification optique dans un milieu.

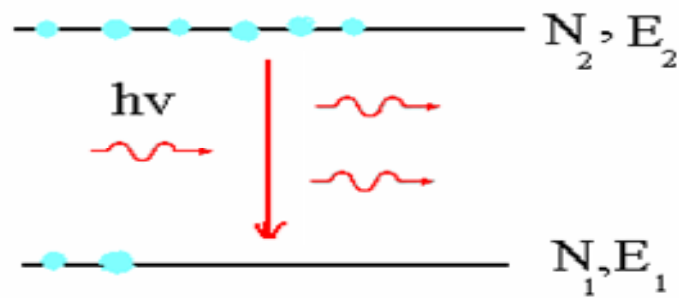


Figure (II-3) : Phénomène d'émission stimulée [13].

Pour obtenir l'émission stimulée d'atomes, la population  $N_2$  du niveau d'énergie  $E_2$  doit être supérieure à celle du niveau fondamental  $N_1$ . Ceci est obtenu en peuplant le niveau supérieur par une excitation extérieure, appelée pompage, conduisant à un phénomène d'inversion de population ; l'équilibre thermique se trouve détruit. En effet, pour un écart d'énergie important entre les niveaux excite et émetteur, la distribution de (Boltzmann  $N_2 / N_1 = e^{-\Delta E / KT}$ ) repartirait essentiellement la population sur le niveau inférieur  $E_1$ .

### II.3 Les transitions non radiatives :

Sous l'effet d'un rayonnement électromagnétique, un ion de terre rare présent dans une matrice va absorber ce rayonnement et faire passer ses électrons d'un état fondamental  $E_1$  à un niveau excite  $E_2$ . Une fois dans son état excite, l'électron peut retrouver son état initial par deux processus :

Radiatif comme décrite ci-dessus,

Non radiatif.

Lorsqu'un ion se désexcite de façon non radiative, l'énergie de la transition est transférée à la matrice. Cette énergie est absorbée par les vibrations des atomes présents dans le milieu. Ces vibrations sont quantifiées et caractéristiques de la matrice hôte.

La probabilité totale de relaxation  $W_T$  d'un état excite  $i$  vers un état quelconque  $j$  est donnée par la somme des probabilités de relaxation radiative  $A_{ij}$  et non radiative  $W_{NR,ij}$ .



$$W_T = \sum_j (A_{ij} + W_{NR,j}) \quad (\text{II-11})$$

La probabilité de relaxation  $W_T$  est inversement proportionnelle à la constante de temps du déclin de fluorescence ou durée de vie moyenne  $\tau$  selon la relation :

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_{rad}} + \frac{1}{\tau_{nrad}} = W_T \quad (\text{II-12})$$

La probabilité de relaxation non radiative  $W_{NR}$  y est principalement liée à la relaxation multi phonon et aux transferts d'énergie. Comme pour les processus radiatifs, on peut caractériser cette probabilité de transition en fonction de la différence d'énergie  $\Delta E$  et du nombre de phonons  $p$  de la matrice concernées tel que :

$$W_{NR}^p(T) = W_{NR}^p(0) \left( 1 + \frac{1}{\exp\left(\frac{\Delta E}{kT}\right) - 1} \right)^p \quad (\text{II-13})$$

Avec  $W_{NR}^p(0)$  la probabilité de transition à 0°K telle que :

$$W_{NR}^p(0) = \beta_{el} \cdot \exp[-\alpha(\Delta E - 2\hbar\omega_{max})] \quad (\text{II-14})$$

$\beta_{el}$  et  $\alpha$  sont deux paramètres expérimentaux qu'on peut trouver dans la littérature pour différents systèmes vitreux et  $\hbar\omega_{max}$  est l'énergie maximale des phonons présents dans le matériau considéré.

On peut remarquer que la probabilité de transition non radiative décroît avec la différence d'énergie  $\Delta E$ . Lorsque cette différence est telle que le nombre de phonons  $p$  nécessaire à la transition est inférieure à 4, la probabilité de transition non radiative entre en compétition avec le processus radiatif.

La probabilité de transition non radiative croît avec la température et conduit donc à une diminution de la durée de vie d'après l'équation (II-13). Pour des niveaux d'énergie dont l'écart  $\Delta E$  est proche de  $kT$ , on a un peuplement thermique des niveaux considérés ; ce

phénomène est fréquent dans le cas des niveaux Stark. A température ambiante, on peut considérer que  $kT=200$  volt.

### II.3.1 Les transferts d'énergie :

Nous avons vu que la probabilité de transition non radiative est liée aux relaxations multi phonon et aux transferts d'énergie entre les différents ions. Ces mécanismes d'interaction entre ions voisins sont fonction de la distance inter ionique qui diminue avec l'augmentation de la concentration. Lors du processus de transfert d'énergie, un ion donneur va céder son énergie à un ion accepteur sans émission radiative. Ce transfert d'énergie peut s'effectuer entre ions identiques ou non. Il existe différents types d'interaction entre les ions conduisant au dépeuplement d'un niveau excité.

#### - Transfert d'énergie résonant

Dans ce cas, on considère que les deux ions proches voisins présentent des niveaux d'énergie identiques. L'ion donneur D dans son état excité va relaxer vers son état fondamental, ou un niveau inférieur. L'ion accepteur A va alors absorber l'énergie libérée et ainsi passer de son niveau fondamental vers un de ses niveaux excités. Cette énergie peut être transférée entre ions de terre rare de proche en proche, jusqu'à la rencontre d'une impureté ; dans ce cas l'énergie est perdue et ne conduit pas à une émission de photons. (FigureII- 4:a, b)

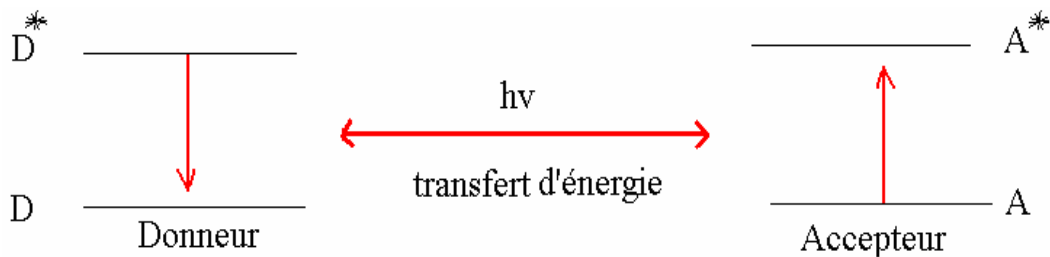


Figure (II-4-a) : Transfert d'énergie résonant avec retour à l'état fondamental.

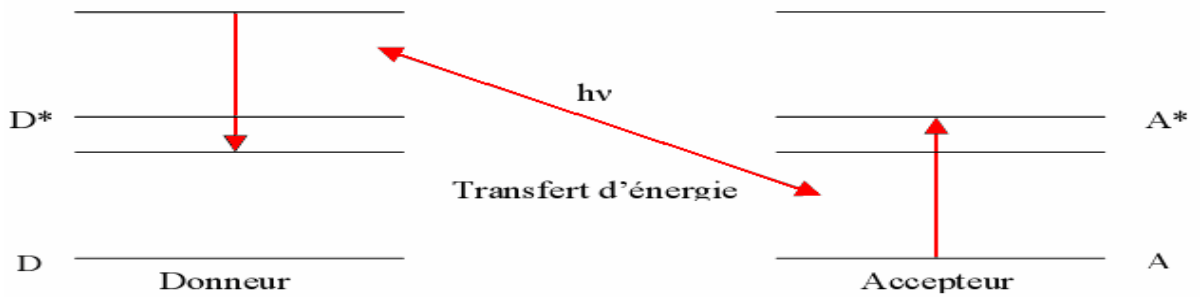


Figure (II-4-b) : Transfert d'énergie résonant quelconque.

- Transfert d'énergie assiste de phonons

Dans certains cas, la différence d'énergie entre les niveaux impliqués dans le transfert n'est pas identique. Le transfert d'énergie ne fait donc pas intervenir les mêmes états excités. Pour que la conservation de l'énergie soit totale il faut qu'il y ait soit absorption soit émission de phonons, suivant que l'énergie de la transition  $D^* \rightarrow D$  est supérieure ou inférieure à celle de la transition  $A \rightarrow A^*$  (Figure II-5: a, b).

Avec :

A : l'état fondamental d'atome accepteur.

A\* : premier état fondamental d'atome accepteur.

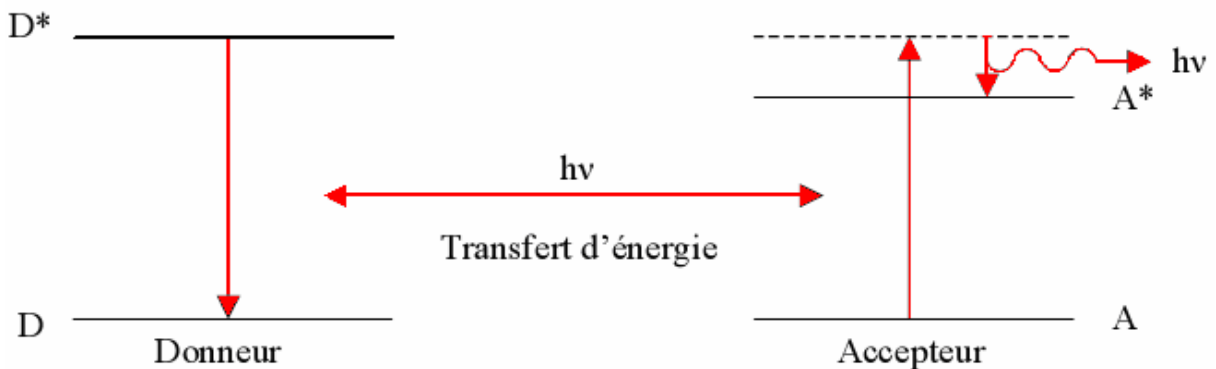


Figure (II-5-a):

Transfert d'énergie assiste par émission de phonons

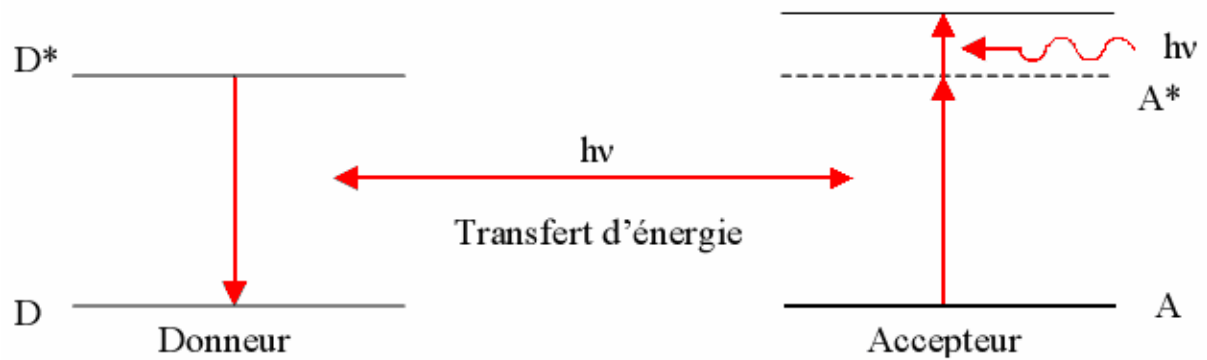


Figure (II-5-b) :

Transfert d'énergie assisté par absorption de phonons

- Transfert d'énergie par up conversion

L'up conversion est un processus dans lequel deux transitions successives au niveau de l'ion donneur font passer l'ion accepteur dans son état excité à une énergie double de celle du niveau donneur. Un premier photon sert à atteindre le premier état excité A\* (par transfert d'énergie résonant, ou par transfert d'énergie assisté de phonons), puis un second photon fait passer l'ion de terre rare de l'état A\* vers l'état A\*\* (toujours par transfert d'énergie résonant, ou par transfert d'énergie assisté de phonons). Il est donc possible de produire par exemple une radiation visible à partir d'une radiation dans l'infrarouge par émission de la transition  $A^{**} \rightarrow A$ .

Avec :

A\*\* : deuxième état excité d'atome accepteur.

Le processus d'up conversion peut se dérouler de deux façons différentes, par absorption de deux photons par un seul ion, également appelé absorption dans l'état excité, ou par relaxation croisée entre deux ions excités (Figure (II-6)) [14].

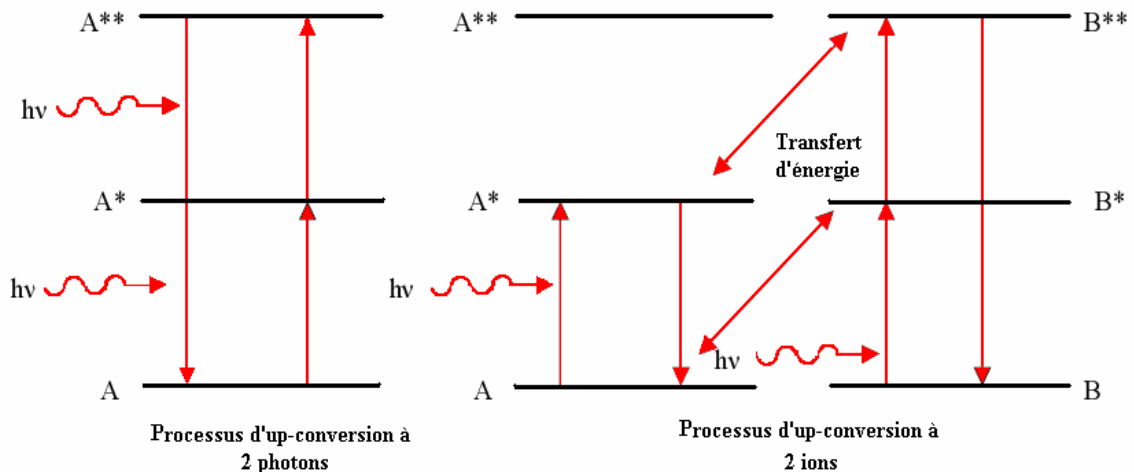


Figure (II-6): processus d'up conversion

Par la suite, nous allons nous intéresser à l'un des terres rare. C'est l'erbium qui est indispensable pour l'amplification dans les fibres optique.

### III L'ion Erbium :

Les ions de terre rares, essentiellement l'erbium, ont joué un rôle crucial dans le développement de la technologie de télécommunication optique. Et son utilisation avec une petite quantité dans la fibre optique a fait l'objet de plusieurs études sur des différents types de verres, tel que les silicates, les germanites, les phosphates, les fluorures et les sulfures. Et cela pour fournir une transition amplificatrice à la longueur d'onde de 1550nm.

#### III.1 La luminescence Erbium :

L'atome d'erbium, de numéro atomique  $Z=68$ , fait partie de la famille des lanthanides. Cette famille d'atomes (de  $Z=57$  à  $Z=71$ ) a la particularité d'avoir une couche interne (4f) partiellement remplie. Les électrons des couches extérieures 5s, 5p, 5d et 6s forment ainsi un "écran protecteur" pour la couche 4f [15]. Ces éléments sont souvent assimilés au groupe des terres rares, même si ce dernier contient en plus les éléments scandium et yttrium. Leur structure électronique est celle du Xénon:  $[1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^2 4p^6 4d^{10} 5s^2 5p^6]$ , à laquelle s'ajoutent deux électrons 6s, des électrons 4f et éventuellement un électron 5d et seuls les électrons de la couche 4f participent aux émissions radiatives.

Dans les matériaux solides on les retrouve sous forme d'ions trivalents de configuration  $[Xe] 4f^N$ , correspondant au remplissage progressif de la couche 4f du système périodique des éléments. La principale caractéristique des terres rares est le phénomène de contraction des sous-couches 4f. Sous l'influence d'un important puits de potentiel à proximité du noyau, l'extension spatiale des fonctions propres diminue au début de la famille des lanthanides. Ceci a pour effet d'attirer vers les couches plus internes les électrons 4f, qui seront ainsi protégés de l'extérieur par les couches externes 5s et 5p. La contraction de l'orbitale 4f, connue sous le nom de "contraction des lanthanides" fait la particularité de ces ions et se reflète dans bon nombre de leurs propriétés. Les transitions issues des niveaux d'énergie de cette configuration incomplète 4f, engendrent des longueurs d'onde allant de l'ultraviolet à l'infrarouge [12].

Z	Élément	Configuration des atomes	Configuration des ions
58	Cérium (Ce)	$[Xe]4f^25d^06s^2$	$[Xe]4f^1$
68	Erbium (ER)	$[Xe]4f^{12}5d^06s^2$	$[Xe]4f^{11}$
70	Ytterbium (Yb)	$[Xe]4f^{14}5d^06s^2$	$[Xe]4f^{13}$

Tableau (II-1) : Exemple d'une Configuration électronique des terres rares

Quoique, d'une façon générale, la spectroscopie établit une suite de tous les états que peut prendre un ion (ou un atome) en fonction de son moment angulaire total, J, de la somme, sur l'ensemble des électrons qui le composent, des moments angulaires, L, et des spins, S. Cet état global (J, L, S) dépend donc de l'état de chacun des électrons de l'ion via leurs quatre nombres quantiques  $n, l, m$  et  $s$ . Plusieurs arrangements (combinaisons des quatre nombres quantiques) peuvent conduire à ce même vecteur (J, L, S).

Un même niveau d'énergie, déterminé par le nombre quantique  $n$ , peut alors correspondre à plusieurs états d'un ion et donc le niveau est dégénéré. L'inclusion de ces ions erbium dans une matrice (comme la silice) fait que chaque ion erbium subit le champ électrique des atomes voisins. Ce champ modifie les propriétés de l'ion erbium par effet Stark et lève la dégénérescence des états d'énergie [16] La transition entre le niveau  $4I_{13/2}$  et  $4I_{15/2}$

présente une émission à  $1.53\mu\text{m}$ , longueur d'onde correspondante au minimum d'atténuation d'une fibre de silice (de l'ordre de  $0.2\text{dB/Km}$  à  $1.55\mu\text{m}$ ) [17]. L'analyse spectroscopique de l'ion erbium dans la matrice de verre conduit au diagramme d'énergie représenté en figure (II-8). Les longueurs d'onde des transitions entre niveaux y sont données en nanomètres [16].

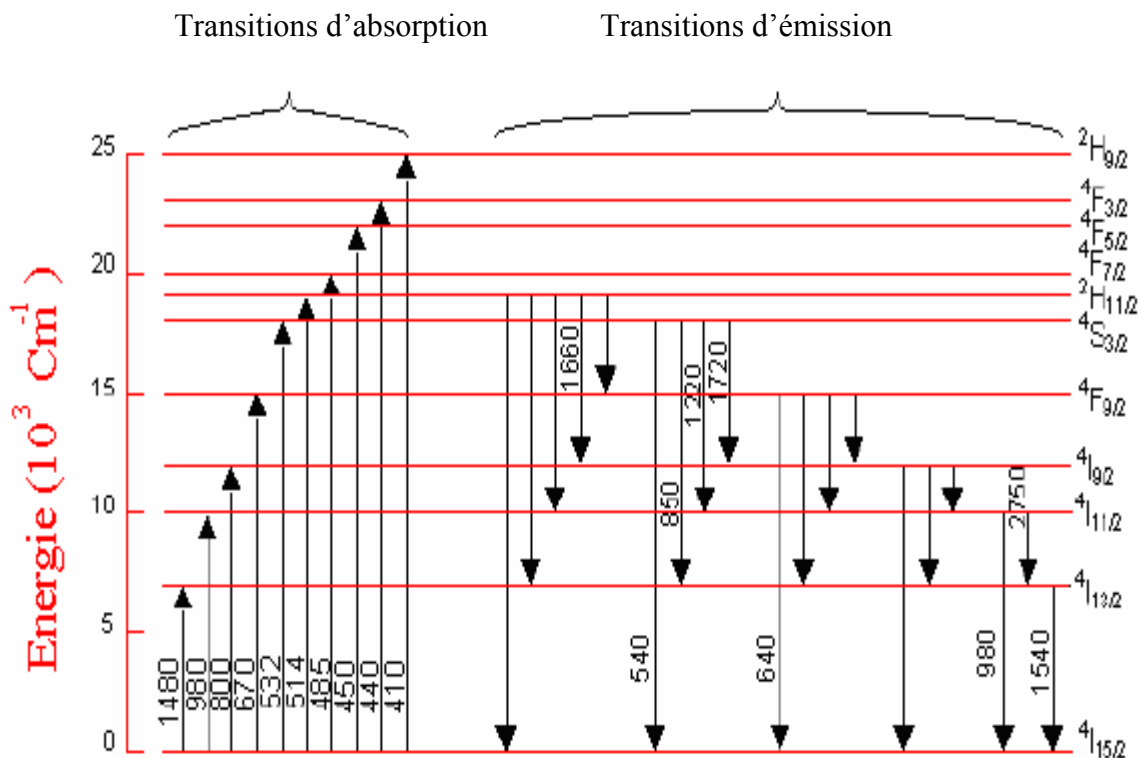
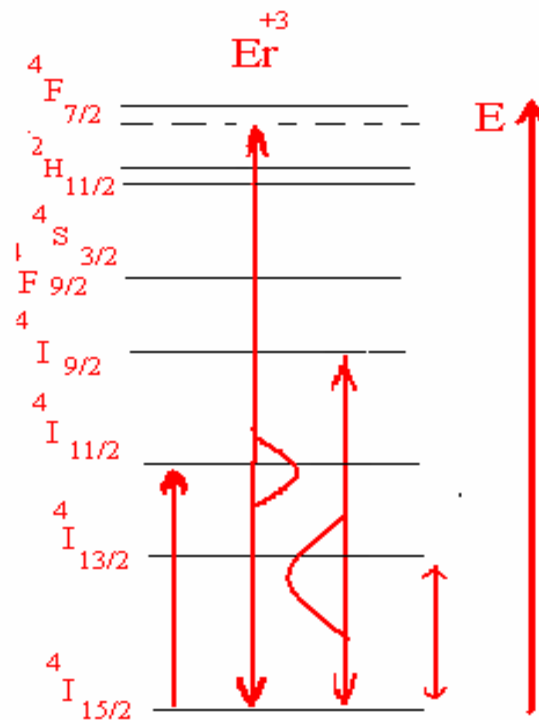


Figure (II-7) : Diagramme d'énergie partiel de l'ion erbium dans une matrice de verre

La figure (II-8) présente les différents niveaux d'absorption et les différentes transitions possibles de cet atome, principalement dues à des interactions dans la couche  $4f$ . De plus, l'insertion de l'atome d'erbium dans une matrice vitreuse modifie ses propriétés spectrales [15].

Figure (II-8) : Niveaux d'énergie de l'ion Er<sup>3+</sup> [18].

### III.2 Largeur des transitions optiques :

Dans cette partie nous allons présenter les différents mécanismes qui sont à l'origine de l'élargissement des niveaux d'énergie. L'une des principales causes de ce phénomène est le fait que les ions terre rare occupent dans la matrice hôte, verre ou cristal, des sites cristallographiques différents. Compte tenu de l'influence que la symétrie locale a sur les propriétés spectroscopiques de la terre rare, cela implique un comportement spécifique pour chaque ion de la matrice, par rapport à ses congénères. Ce type d'élargissement est connu sous le nom d'élargissement inhomogène et dans les cristaux il est lié à :

- La variation locale progressive du paramètre de maille.
- La présence d'impuretés.
- La formation de paires ou d'agrégats de dopants.

Dans les verres, l'élargissement inhomogène est dû au désordre intrinsèque de la matrice vitreuse. Dans une telle matrice chaque ion se trouve dans un environnement unique,



ce qui explique le fait que les terres rares placées dans une matrice vitreuse présentent des largeurs inhomogènes très supérieures à celles dans un environnement cristallin.

En supposant une répartition statistique des ions dans un seul site légèrement déformé d'un ion à l'autre, nous obtenons pour la raie inhomogène, traduisant la distribution des sites dans la matrice, une forme Gaussienne. La largeur à mi-hauteur de cette gaussienne est la largeur inhomogène. La largeur de la base de la gaussienne est la distribution des sites (la figure (II-9)).

En plus de l'élargissement inhomogène, plusieurs autres processus vont contribuer à l'élargissement d'une transition optique. Ces processus sont dits "homogènes", parce que les ions luminescents sont tous affectés de manière identique. Dans le cas d'un ion de terre rare la largeur homogène d'une transition entre niveaux d'énergie peut se décomposer suivant deux contributions principales. Tout d'abord la largeur naturelle des niveaux initial et final de la transition considérée. Cette largeur est directement liée à la durée de vie des niveaux et découle du principe d'incertitude d'Heisenberg. La deuxième cause de l'élargissement homogène est le couplage entre les ions terres rares et la matrice hôte, à travers les quanta d'énergie de vibration du réseau cristallin: les phonons. Les différents processus possibles d'interaction avec les phonons sont : Le processus direct. ; Le processus Raman. ; Le processus Raman intrinsèque ; Le processus d'Orbach.

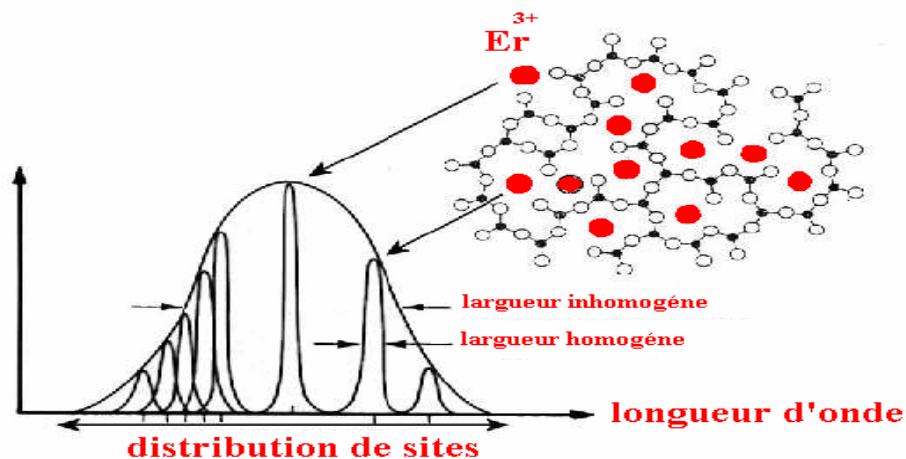


Figure (II-9) : Illustration des différents types d'élargissement à l'origine de la forme d'une transition optique. L'enveloppe inhomogène est l'enveloppe des raies homogènes propres à chaque ion.

L'importance relative de ces processus dépend fortement des niveaux considérés: par exemple les niveaux Stark thermiques seront affectés le plus par les processus directs car l'écart

énergétique entre ces niveaux est assez faible, de l'ordre de quelques dizaines de  $\text{cm}^{-1}$ . Il est donc très facile de passer d'un tel niveau Stark à l'autre moyennant l'échange d'un seul phonon, ce qui entraîne des durées de vie très courtes pour ces niveaux thermiques, de l'ordre de la nanoseconde.

#### **IV Principes de l'amplification optique :**

##### **IV.1 Les différentes bandes d'amplification :**

La réalisation d'un amplificateur optique nécessite la présence d'un milieu actif, dans notre cas (un verre d'alumina ou silicate) dopé erbium, et de deux faisceaux laser. Soit le cas très simple d'un système à deux niveaux (multiplets), représenté dans la figure (II-10), ayant les populations  $N_1$  et respectivement  $N_2$ .

Un premier faisceau très énergétique, dit de pompe, réalise le transfert de population entre le niveau fondamental et le niveau de pompage. Une désexcitation non radiative très rapide à partir de ce dernier niveau doit permettre le passage des électrons vers le niveau amplificateur. Si nous prenons l'exemple de l'ion  $\text{Er}^{+3}$  avec sa transition autour de  $1.55 \mu\text{m}$ , entre les niveaux  ${}^4I_{13/2}$  et  ${}^4I_{15/2}$ , pour un pompage résonnant à  $1.48 \mu\text{m}$ , le niveau de pompage est un des sous niveaux Stark supérieurs du niveau  ${}^4I_{13/2}$ , le niveau amplificateur étant, dans ce cas, le sous niveau Stark inférieur de ce multiplet.

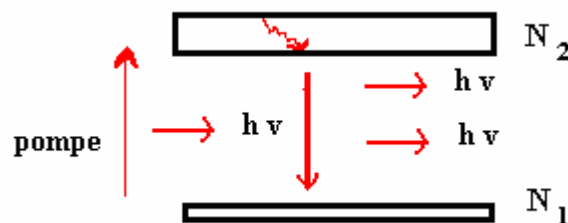


Figure (II-10): Principe de l'amplification optique.

Au passage d'un deuxième faisceau, dit faisceau sonde ou signal, dont la longueur d'onde correspond à la transition entre le niveau amplificateur et le niveau fondamental, des photons identiques à ceux qui composent ce faisceau excitateur seront réémis, grâce au phénomène d'émission stimulée, si le nombre de photons réémis est supérieur au nombre de photons absorbés par le milieu actif, le faisceau signal ressortira amplifié.

## V Amplificateur Optique :

### V.1 Principe d'un système à trois niveaux :

L'amplification optique est basée sur certaines transitions électroniques des ions erbium. Cette amplification optique repose sur le phénomène d'émission stimulée, la figure (II-11) en montre le principe.

Les électrons initialement au niveau fondamental sont excités au niveau le plus haut dit de pompe par l'absorption d'un photon de pompe à la longueur d'onde  $\lambda_p$ . La durée de vie du niveau de pompe est extrêmement courte (environ  $3\mu s$  dans une matrice à base de silice dopée Erbium) et ces électrons se relaxent très rapidement sur le niveau  $I_{13/2}$  sans engendrer d'émission radiative. Ce niveau possède une durée de vie très grande devant celle du niveau de pompe : environ  $10ms$ . Ainsi un très grand nombre d'électrons s'accumule à l'état excité, ce qui définit une inversion de population.

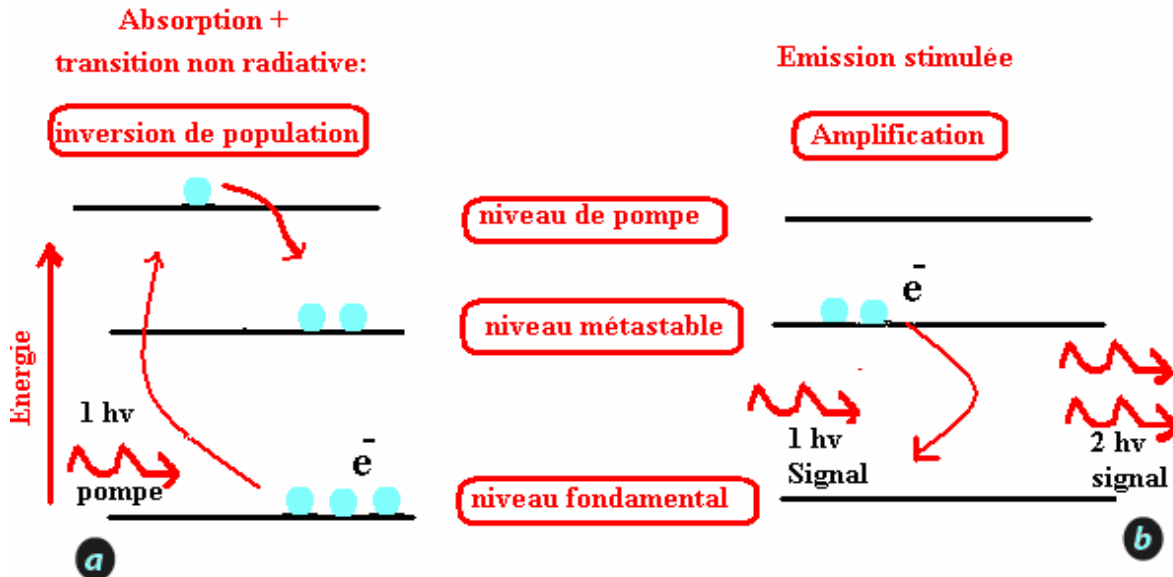


Figure (II-11) : Amplification optique à trois niveaux.

Le passage d'un photon incident de longueur d'onde  $\lambda_s$  provoque alors une recombinaison électron-trou suivant un processus d'émission stimulée, donnant ainsi naissance à un deuxième photon de caractéristiques identiques. Cela conduit donc à une amplification du signal le long de la fibre optique.

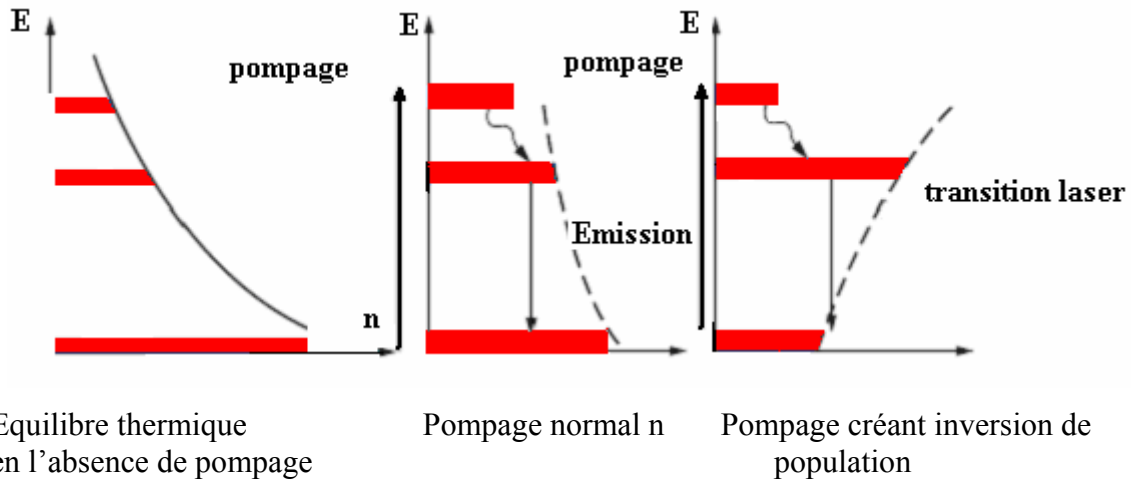


Figure (II-12) : variation des populations des niveaux d'énergie d'un système à trois niveaux sous l'effet du pompage [13].

En pratique, il est possible de transférer plus de la moitié de la puissance de la pompe absorbée sur le signal (figure : (II-12)). Si le pompage est insuffisant, l'inversion de population n'a pas lieu : le signal à amplifier est alors absorbé majoritairement dans la fibre et est donc atténué.

## **VI Conclusion :**

L'avènement des amplificateurs à fibre optique dopée aux terres rares a rendu possible le dépassement des débits des années 1990.

Dans ce chapitre nous avons expliqué le principe physique de l'amplification optique dans une fibre optique dopée Erbium en tenant compte des paramètres spectroscopiques du dopant.

## Chapitre III

### *Modélisation d'une fibre optique dopée Erbium*

## **I Introduction :**

Les fibres optiques à haut débit sont devenues possibles grâce à l'amplification optique intégrée, en particulier en utilisant les EDFA. En effet les EDFA sont en phase de remplacer la plupart des régénérateurs grâce à leurs intégrations faciles dans le réseau.

Dans ce chapitre nous étudions cet amplificateur appelé : amplificateur optique à fibre dopée erbium (EDFA).

Ce chapitre est structuré de la manière suivante: dans un premier temps nous présentons les densités de population des trois premiers niveaux énergétiques qui permettent les différentes transitions radiatives en fonction des paramètres spectroscopiques, et parmi ces paramètres on a fait varier la puissance de la pompe, en plus nous avons optimisé la concentration de l'ion d'erbium (Er) introduites dans la matrice de la silice, par différentes techniques. Et finalement, nous avons estimé le gain (G) en fonction de la puissance de la pompe pour différentes longueurs (L) de notre guide d'onde (EDFA).

## **II Descriptif du dispositif :**

Comme n'importe quel amplificateur, un amplificateur optique absorbe l'énergie fournie par le système extérieur désigné par le pompage .il la restitue au signal pour l'amplifier.

Les amplificateurs à fibre fonctionnent dans la fenêtre de transmission à la longueur d'onde de 1550 nm. Un de leurs avantages est leur intégration dans le dispositif de transmission : ce dispositif se compose pour l'essentiel : d'une fibre active de quelques centimètres de longueur, dopée avec des ions (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. 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. Il est habituel d'ajouter deux

isolateurs (diode optique), une à l'entrée, l'autre à la sortie, qui permettent d'assurer la stabilité des caractéristiques de gain en bloquant tous les faisceaux lumineux susceptibles de revenir en aval qui pourraient créer une cavité, et faire osciller le dispositifs, puis le transformer en laser 980 et 1480nm qui sont les deux longueurs d'onde de pompe le mieux adaptées a l'EDFA, car les diodes laser à semi-conducteur sont disponibles à ces longueurs d'ondes. Le multiplexeur optique sélectifs en longueurs d'onde, doit présenter une perte d'insertion faible à ces deux longueurs d'onde afin d'optimiser le rendement optique du système (voir figure III-1) :

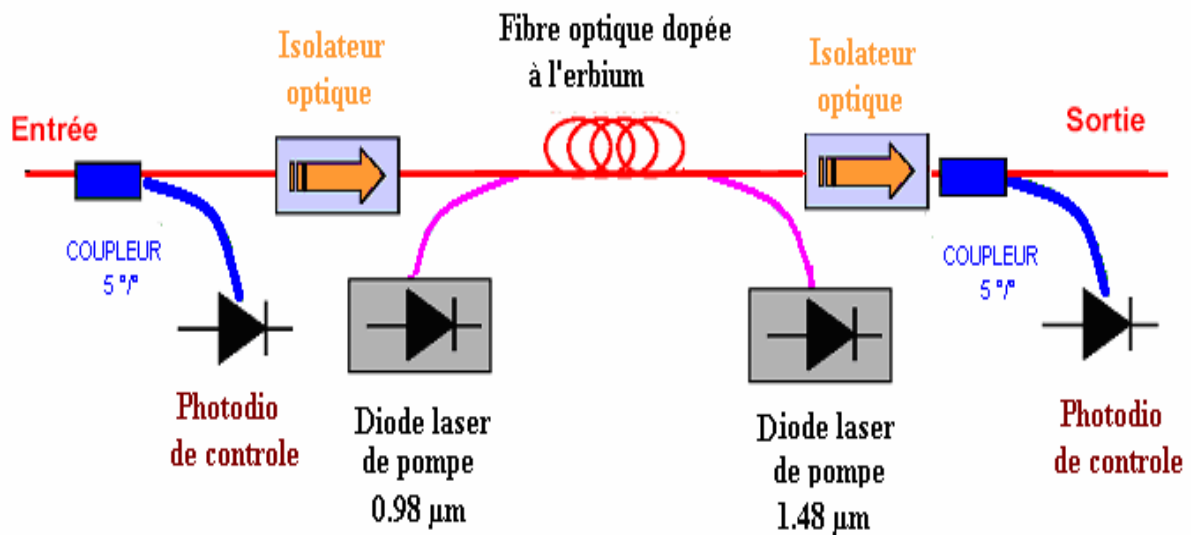


Figure (III-1) : Exemple d'amplificateur à fibre optique dopé à l'erbium.

### **II 1 Propriétés de l'Erbium dans une EDFA :**

L'intégration de l'amplificateur EDFA sur un circuit optique intégré limite sa longueur à quelques centimètres pour la plupart des applications. Cela implique que la concentration de l'erbium doit être optimisée. En effet, pour les concentrations élevées d'erbium, la distance entre les ions erbium  $Er^{+3}$  est petite, et les interactions entre différents ions prennent place suite à la formation de dipôle électrique, voir figure (III-2)

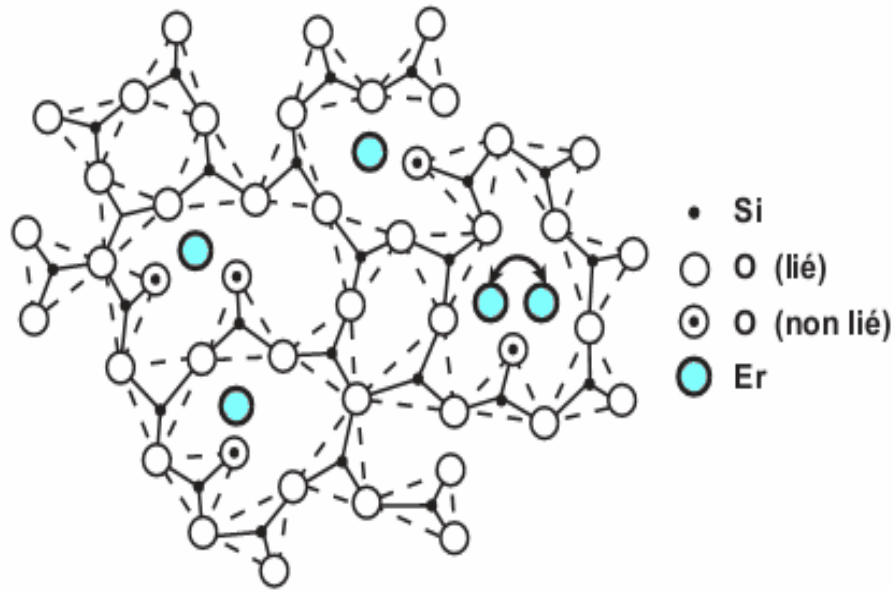


Figure (III-2) : la répartition de l'ion d'Erbium dans le silicate

Cette interaction diminue la fraction excitée des ions  $\text{Er}^{+3}$  pour une puissance de pompe donnée dans cette optique nous avons essayé, dans un premier temps, d'optimiser la concentration d'erbium pour obtenir les meilleurs résultats.

En outre pour une concentration d'Erbium donnée nous avons étudié l'influence de la puissance de la pompe sur l'évolution de l'inversion de population des trois niveaux énergétiques concernées (voir figure (III-3)) en résolvant par la suite un système d'équation.

## **II 2 Pompage optique des EDFA :**

La fibre optique est dopée avec une certaine concentration d'ions actifs permettant l'amplification laser. La modélisation nécessite de considérer la dynamique des populations des niveaux électroniques de cet ion sous l'influence d'un pompage optique et d'un signal laser. Il s'agit alors de bien définir la dynamique de l'ion présent dans notre système.

Nous allons utiliser un modèle pour bien saisir le principe. Un système à trois niveaux de l'erbium ( $\text{Er}^{+3}$ ) connu en communications optiques est représenté au dessous (figure (III-3)).



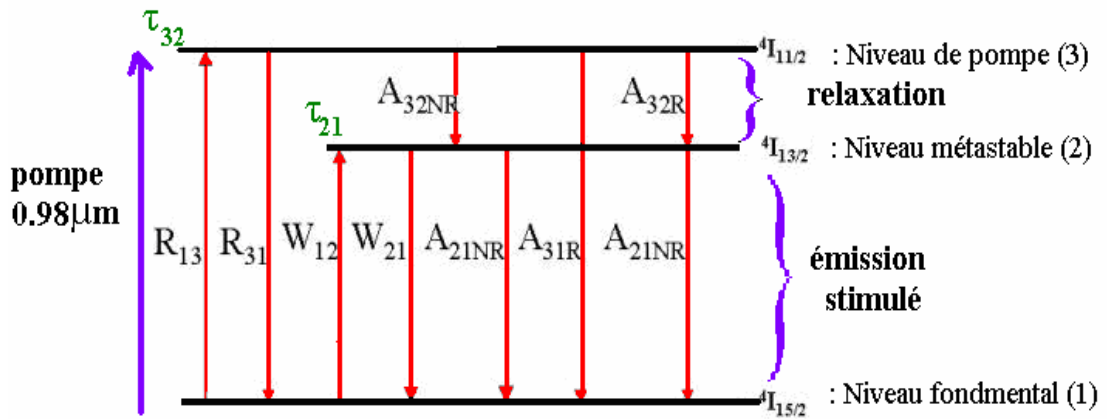


Figure (III-3) : Diagramme des niveaux d'énergie de l'ion erbium correspondant à un système laser à trois niveaux

Avec :

${}^4I_{15/2}$  : correspond au densité de population du niveau  $N_1$  (m-3).

${}^4I_{13/2}$  : correspond au densité de population du niveau  $N_2$  (m-3).

${}^4I_{11/2}$  : correspond au densité de population du niveau  $N_3$  (m-3).

Les niveaux  $N_1$ ,  $N_2$  et  $N_3$  sont respectivement le niveau fondamental, métastable et de pompe.

Une fois un électron excité, la probabilité pour qu'il redescende à l'état fondamental dépend du niveau sur lequel il se situe, cette probabilité est appelée « temps de vie » du niveau ; on considère que l'électron « vit » sur un niveau pendant un certain temps après excitation

Le niveau  $N_2$ , se caractérise par une durée de vie longue, notée  $\tau$ , approximativement égale à 10 ms. La transition qui nous intéresse se produit entre les niveaux  $N_1$  et  $N_2$ .

Il est important de s'intéresser à ces temps de vie, en effet on remarque en particulier que le temps de vie d'un électron sur le niveau  $N_3$  à 980nm est très court par rapport au temps de vie d'un électron situé sur le niveau  $N_2$  à 1530nm (1000 fois environ....) .ainsi on peut considérer

qu'un électron absorbé à 980nm en  $N_3$  se trouve instantanément sur le niveau  $N_2$  à 1550nm. Nous exploiterons ce fait lors de la mise en équations de notre amplificateur.

Soit  $R$ ,  $W$  les transitions respectives entre  $^4I_{15/2}$  et  $^4I_{11/2}$  et entre  $^4I_{15/2}$  et  $^4I_{13/2}$ .

$A$  : représente une désexcitation spontanée. Les indices  $ij$  indiquent que la transition s'effectue du niveau  $i$  vers le niveau  $j$ . Les indices  $R$  et  $NR$  expriment si la transition est radiative ou non.

Le taux de pompage du niveau  $N_1$  vers  $N_3$  et le taux d'émission stimulée de  $N_3$  vers  $N_1$  sont respectivement  $R_{13}$  et  $R_{31}$ . Il existe deux possibilités de désexcitation pour le niveau  $N_3$ , une radiative ( $A_{3R} = A_{31R} + A_{32R}$ ) et l'autre non radiative  $A_{32NR}$ . La désexcitation du niveau 3 est supposée être essentiellement non radiative.  $A_{32R}$  est par conséquent négligeable devant  $A_{32NR}$  qui sera nommé  $A_{32}$  dans la suite de nos calculs. Les taux d'absorption et d'émission stimulée qui existent entre les niveaux  $N_1$  et  $N_2$  sont notés respectivement  $W_{12}$  et  $W_{21}$ . Les désexcitations, radiative et non radiative, à partir du niveau  $N_2$  sont appelées respectivement  $A_{21R}$  et  $A_{21NR}$ , avec  $A_{21R} = 1/\tau$ . Comme la désexcitation est essentiellement radiative,  $A_{21NR}$  sera négligée devant  $A_{21R}$  que l'on nommera  $A_{21}$ . La désexcitation non radiative du niveau (3) est très rapide ce qui à pour conséquence que le taux  $A_{32}$  est très supérieur aux taux  $R_{13}$  et  $R_{31}$ .

### **III La modélisation de l'amplification optique:**

Dans la perspective du développement d'un amplificateur optique, une modélisation permet tant de comprendre quels sont les paramètres décisifs pour l'obtention d'un gain maximum, et également d'expliquer et de prévoir les performances expérimentales qui sont indispensable. Et pour présenter la mise en place d'un modèle d'amplificateur optique, il est important d'utiliser les propriétés spectroscopiques de l'ion  $Er^{+3}$  dans le silicate.

Cette modélisation nous permet de trouver le meilleur compromis entre les différents paramètres pouvant influencer le gain, concentrations en ions dopants, puissance de pompe, longueur et géométrie des guides. Elle servira de base à une future optimisation des guides amplificateurs.

Comme nous l'avons déjà mentionné, plusieurs mécanismes de relaxation se produisent simultanément lors de l'interaction des faisceaux lasers avec des ions  $Er^{+3}$ . Tous ces processus doivent être pris en compte à travers le système précédent (figure (III-3)), et qui génère les équations de population suivantes :

$$\frac{\partial N_1}{\partial t} = A_{21}N_2 + W_{21}N_2 - R_{13}N_1 - W_{12}N_1 + R_{31}N_3 \quad (\text{III-1})$$

$$\frac{\partial N_2}{\partial t} = A_{32}N_3 - W_{21}N_2 - A_{21}N_2 + W_{12}N_1. \quad (\text{III-2})$$

$$\frac{\partial N_3}{\partial t} = R_{13}N_1 - A_{32}N_3 - R_{31}N_3 \quad (\text{III-3})$$

Par définition on a une équation pour la somme des populations des niveaux électroniques du système :

$$N_T = N_1 + N_2 + N_3 \quad (\text{III-4})$$

Avec :  $N_T$  La densité en ion erbium de la fibre.

Beaucoup d'amplificateurs opèrent en régime continu ou en régime pulsé à très haute cadence. Alors, l'évolution des populations des niveaux électroniques atteint un régime stationnaire et conserve cet état permanent. Alors, dans de tels systèmes, la dérivée temporelle de chaque population est nulle :

$$\frac{dN_i}{dt} = 0 \quad (\text{III-5})$$

Ce qui simplifie les équations (III-4) à (III-2). Puisqu' ce système est comme un système laser, il est fermé et conserve le nombre d'atomes, seulement deux des trois équations (III-1) à (III-3) sont utiles et la troisième est redondante. Donc, avec les équations (III-1) à (III-4), il

est possible de former un système  $N_1; N_2$  et  $N_3$ . Nous pouvons ainsi trouver les différents taux de populations des niveaux atomiques  $N_i$  en fonction des taux de transitions stimulées  $W_{ij}$  et des temps de vie spontanés  $\tau_{ij}$  si nous considérons que notre dispositif est de l'erbium pompé à 980 nm alors nous avons :

$$\frac{\partial N_1}{\partial t} = 0 = A_{21}N_2 + W_{21}N_2 - R_{13}N_1 - W_{12}N_1 + R_{31}N_3 \quad (\text{III-6})$$

$$\frac{\partial N_2}{\partial t} = 0 = A_{32}N_3 - W_{21}N_2 - A_{21}N_2 + W_{12}N_1. \quad (\text{III-7})$$

$$W_{12} = \frac{I_s \sigma_{12} \lambda_s}{hc} \quad (\text{III-8})$$

$$R_{13} = \frac{I_p \sigma_{13} \lambda_p}{hc} \quad (\text{III-9})$$

$$W_{21} = \frac{I_s \sigma_{21} \lambda_s}{hc} \quad (\text{III-10})$$

$$R_{31} = \frac{I_p \sigma_{31} \lambda_p}{hc} \quad (\text{III-11})$$

Avec  $\sigma_{13}, \sigma_{31}$  sont la section efficace d'absorption et d'émission de la pompe entre le niveau  $N_1$  et  $N_3$  respectivement.

$\sigma_{12}, \sigma_{21}$  sont la section efficace d'absorption et d'émission du signal entre le niveau  $N_1$  et  $N_2$  respectivement.

$h$  est la constante de Planck égale à :  $6,062 \cdot 10^{-34}$  joule et  $c$  : la vitesse de la lumière qui est égale à :  $3 \cdot 10^8$  m/s.

$\lambda_p, \lambda_s$  sont les longueurs d'onde de pompage et du signal respectivement.

On supposant que les deux faisceaux (pompe et signal) ne se déforment pas au cours de la propagation et  $I_s, I_p$  sont l'intensité du signal et de la pompe respectivement.

**IV Résultats et interprétations :**

En tenant, compte des paramètres spectroscopiques d'une fibre optique dopée Erbium à base de silicate (voir tableau : III-1). Nous présentons les différentes caractéristiques de la fibre obtenues à partir de notre modèle mathématique.

Symbole	Signification	valeur	Unité
$p_P$	Puissance de la pompe	[0,50]	<i>mW</i>
$p_s$	Puissance du signale	$10^{-3}$	<i>mW</i>
$a$	Coefficient d'atténuation	<02	
$\lambda_p$	Longueur d'onde de la pompe	980	<i>nm</i>
$\lambda_s$	Longueur d'onde de la signale	1550	<i>nm</i>
$N_T$	Concentration d'erbium	$1*10^{20} \sim 1*10^{27}$	$m^{-3}$
$\sigma_{13}$	Section efficace d'absorption de la pompe	$2.58*10^{-25}$	$m^2$ [19]
$\sigma_{31}$	Section efficace d'émission de la pompe	$0*10^{-25}$	$m^2$ [19]
$\sigma_{12}$	Section efficace d'absorption du signale	$5.36*10^{-25}$	$m^2$ [20]
$\sigma_{21}$	Section efficace d'émission du signale	$5.41*10^{-25}$	$m^2$ [20]
$\tau_{21}$	durée de vie radiative	$7*10^{-3}$	<i>s</i> [20]
$\tau_{32}$	durée de vie non radiative	$1*10^{-5}$	<i>s</i> [20]
$A_s$	Section du faisceau du signal	$2*10^{-6}$	$m^2$
$A_p$	Section du faisceau de la pompe	$2*10^{-6}$	$m^2$
$V_s$	Fréquence du signal	$193.1*10^{12}$	<i>Hz</i>
$V_p$	Fréquence de la pompe	$305.9*10^{12}$	<i>Hz</i>
$\Gamma_p$	Facteur de confinement pour la pompe	1	[21]
$\Gamma_s$	Facteur de confinement Pour le signal	1	[21]

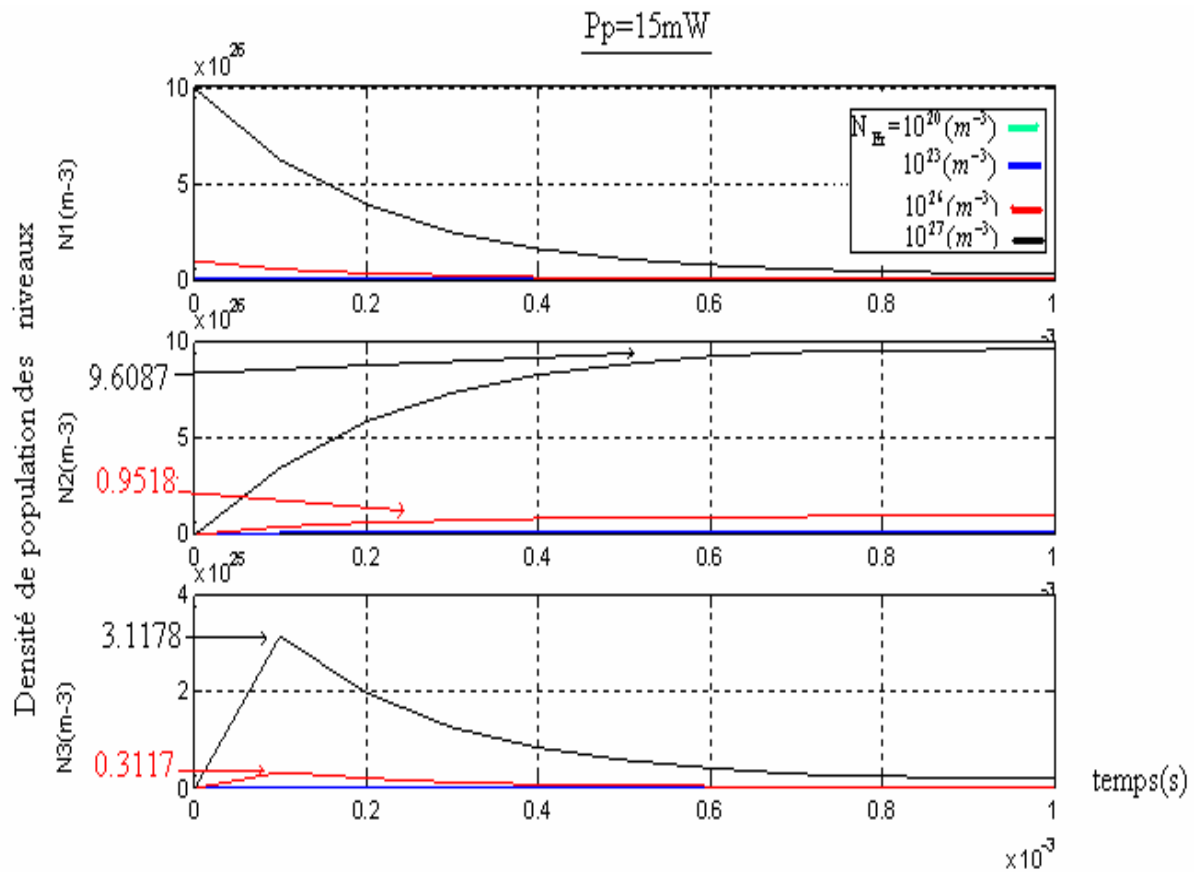
A	Section du faisceau du signal ou pompe	$10 \cdot 10^{-12}$	$m^2$
---	--	---------------------	-------

Tableau (III-1) : Paramètres physiques d'un amplificateur optique à base de silicate avec leurs unités respectives.

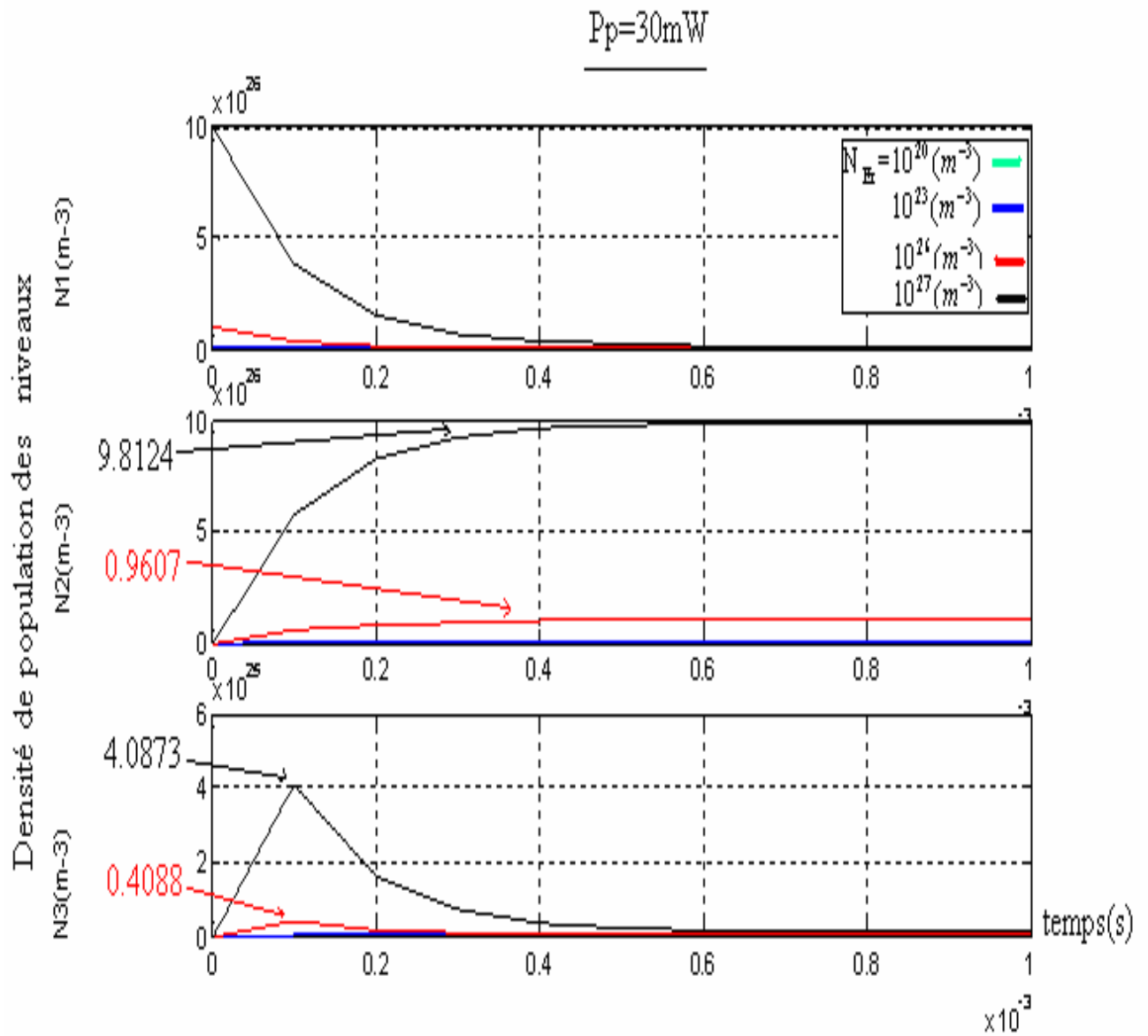
#### **IV.1 La variation des équations de populations des trois premiers niveaux énergétiques $N_1$ , $N_2$ et $N_3$ en fonction du temps(s) :**

Pour différentes concentration d'Erbium variant de  $10^{20}$  à  $10^{27} \text{ m}^{-3}$  nous remarquons que le processus transitoire (inversion de population) est meilleurs lorsque on augmente la concentration d'erbium cependant, cette augmentation, est limitée par la solubilité de ce dernier dans le silicate [22].

Les figures suivantes (III-4 ; III- 5; III- 6) montrent l'évolution des densités de population des trois premiers niveaux  $N_1$  ;  $N_2$  et  $N_3$  en fonction du temps pour des puissances de la pompe de 15mW ,30mW et 50mW

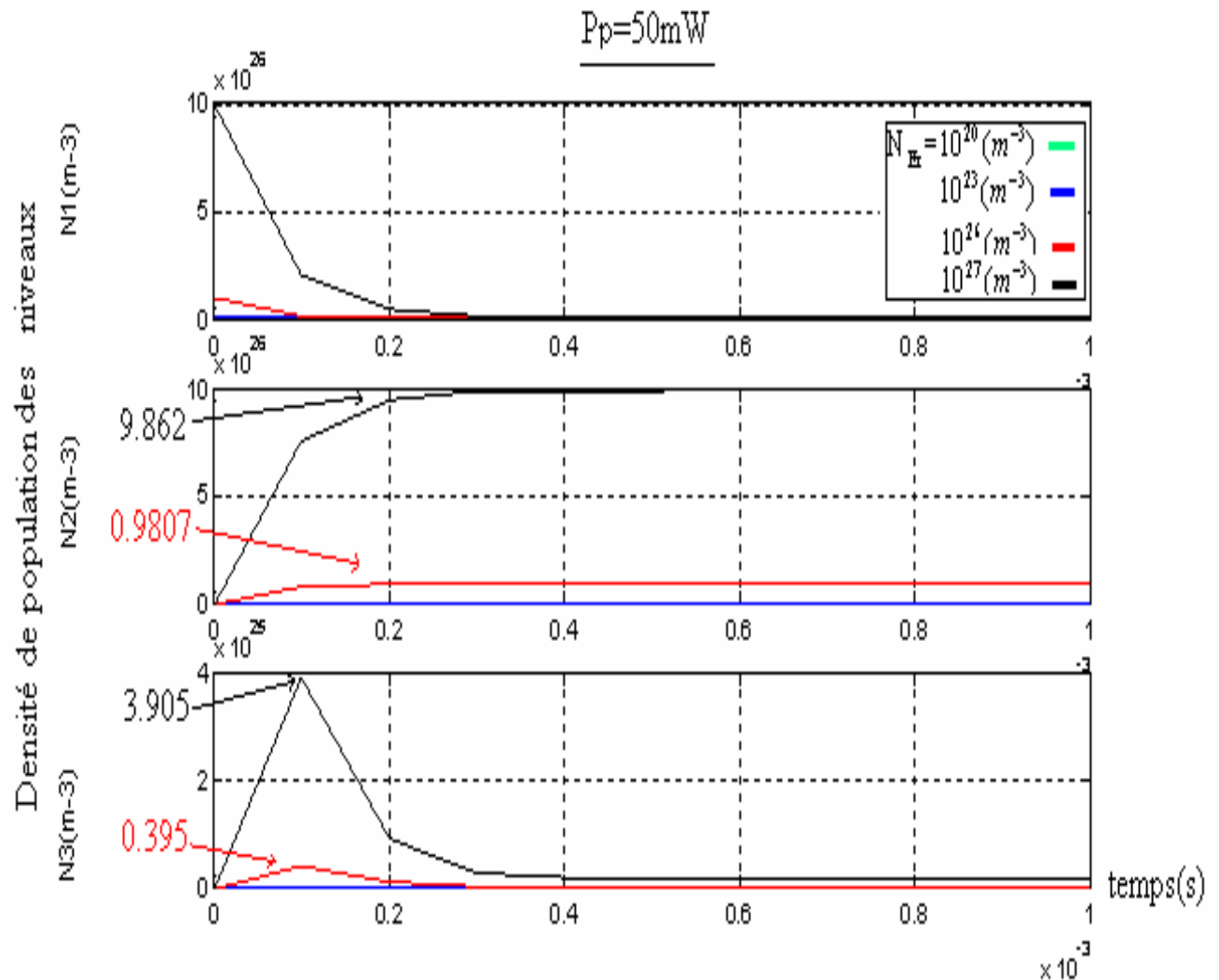


La figure (III-4) : Variation des densités de populations de l'ion Erbium pour différentes concentration et pour une puissance de 15mW.



La figure (III-5) : Variation des densités de populations de l'ion Erbium pour différentes concentration et pour une puissance de 30mW



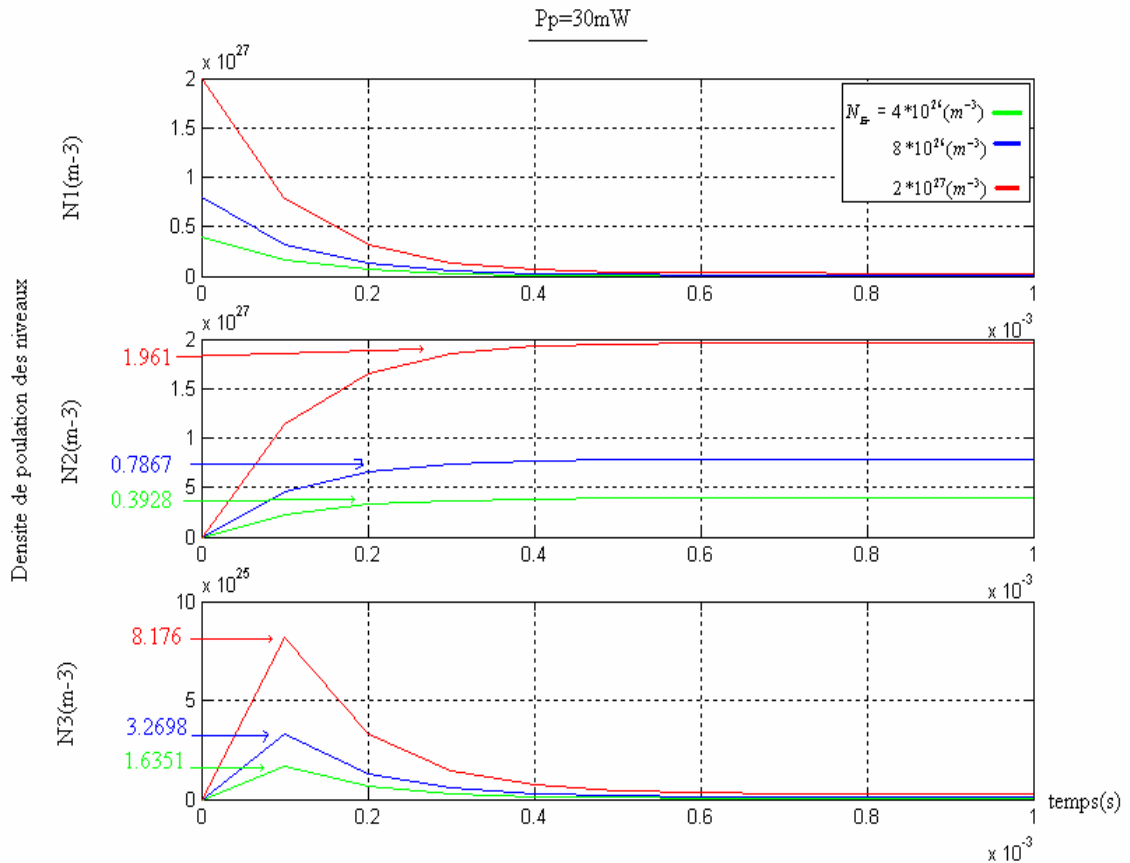


La figure (III-6) : Variation des densités de populations de l'ion Erbium pour différentes concentration et pour une puissance de 50mW

Nous remarquons que l'inversion de population est presque totale a partir de 0.4 ms pour les puissances de pompe de 30mW et 50mW .Cependant pour une puissance de 15mW l'inversion n'est totale que lorsque le temps dépasse 0.8ms .D'un autre coté, le maximum de transition du niveau  $I_{11/2}$  au niveau  $I_{15/2}$  est obtenue pour un temps au alentour de 0.1ms, peu de différence est remarqué pour les deux puissances de 30 mW et 50 mW ce qui justifie l'utilisation d'une pompe limité à une puissance de 30mW.

Après avoir fixé la puissance de la pompe à 30mW, nous avons optimisé la valeur de la concentration d'erbium au alentour de  $10^{26} \text{ m}^{-3}$ . Les valeurs utilisées sont :

$4 \cdot 10^{26} (\text{m}^{-3})$ ;  $8 \cdot 10^{26} (\text{m}^{-3})$  et  $2 \cdot 10^{27} (\text{m}^{-3})$ . Nous avons tracé les variations de densités de population en fonction du temps comme il est représenté sur la figure suivante :



La figure (III-7) : Variation des densités de populations de l'ion Erbium pour différentes concentration et pour une puissance de 30mW.

Cette figure (III-7) met en évidence la variation des densités de population des états: fondamentale, métastable et intermédiaire des niveaux  $N_1$ ,  $N_2$  et  $N_3$  respectivement en fonction du temps. Les concentrations d'ion d'erbium introduites ici sont :  $4 \cdot 10^{26}$ ,  $8 \cdot 10^{26}$  et  $2 \cdot 10^{27} \text{ m}^{-3}$ . Un phénomène d'inversion de population est clairement observé sur le niveau intermédiaire :  $N_3$  pour les différentes concentrations d'erbium utilisés. En effet, nous remarquons que plus la concentration de population augmente le maximum augmente et ceci

pour les trois concentrations  $4 \cdot 10^{26}$  et  $8 \cdot 10^{26}$ ,  $2 \cdot 10^{27}$ . Les valeurs maximales sont respectivement  $1.64 \cdot 10^{25} \text{ m}^{-3}$ ,  $3.27 \cdot 10^{25} \text{ m}^{-3}$  et  $8.18 \cdot 10^{25} \text{ m}^{-3}$ . On remarque cependant que les trois courbes atteints leurs maximum pour un temps de 0.1ms. Pour une concentration au delà de  $8 \cdot 10^{26} \text{ m}^{-3}$  la courbe se stabilise pour des temps supérieurs ou égales à 0.6 ms, alors que pour les deux autres valeurs de concentrations, les deux courbes de densités de population se stabilisent pour la même valeur 0.4ms. La concentration d'erbium au delà de  $8 \cdot 10^{26} \text{ m}^{-3}$  nous permet donc d'obtenir une meilleure inversion de population.

#### **IV.2 La variation des équations de populations des trois premiers niveaux énergétiques $N_1$ , $N_2$ et $N_3$ en fonction de la puissance de la pompe ( $P_p$ ) :**

En plus, après avoir optimisé la concentration d'ion d'erbium on va s'attaquer à l'un des paramètres essentiels dans cette étude qui est la puissance de la pompe ( $P_p$ ) et pour cela on fixe la concentration des ions actifs d'Erbium de la matrice du silicate sur une gamme de même grandeur de :  $1 \cdot 10^{26}$  au  $10 \cdot 10^{26}$  et on fait varier la puissance de pompage jusqu' à 50mW. Les résultats sont représentés sur les trois figures suivantes (voir figure (III-8, III-9, III-10)).

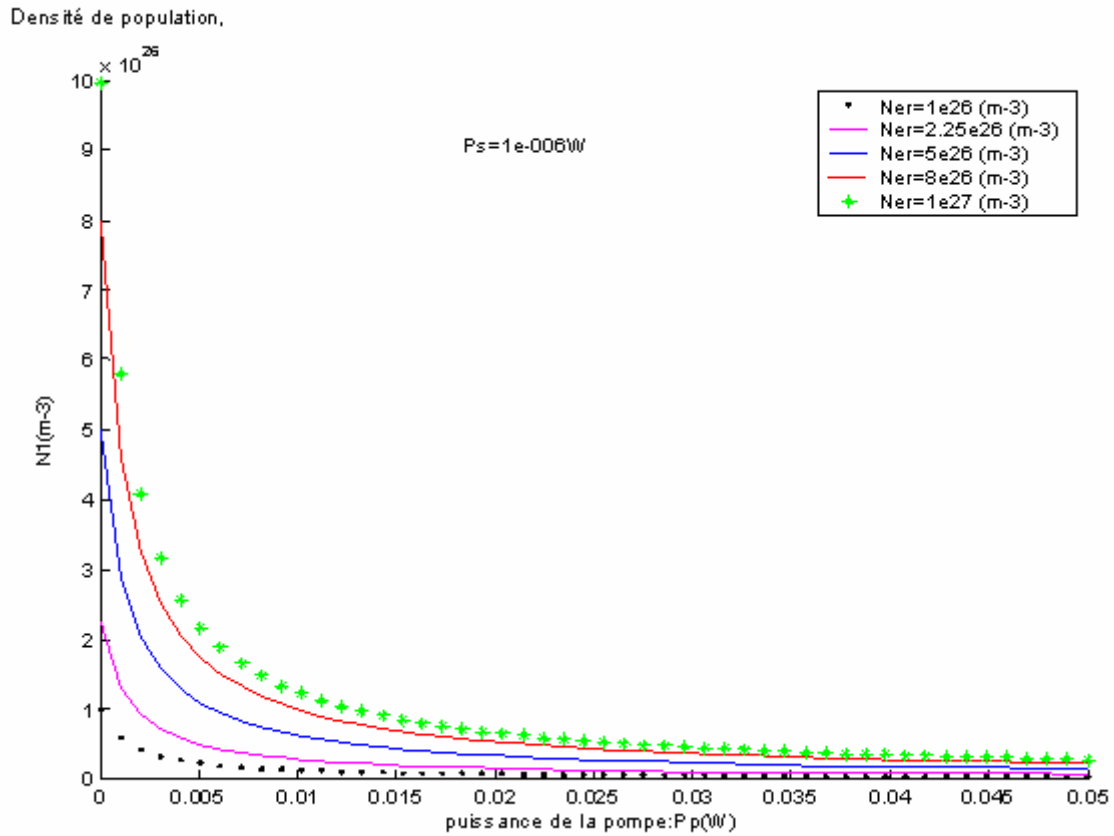


Figure (III-8) : densité de population du niveau fondamentale,  $N_1$ .

La figure (III-8) : Variation des densités de populations de l'état fondamental  $N_1$  pour différentes concentrations et pour une puissance de pompe jusqu'à 50mW.

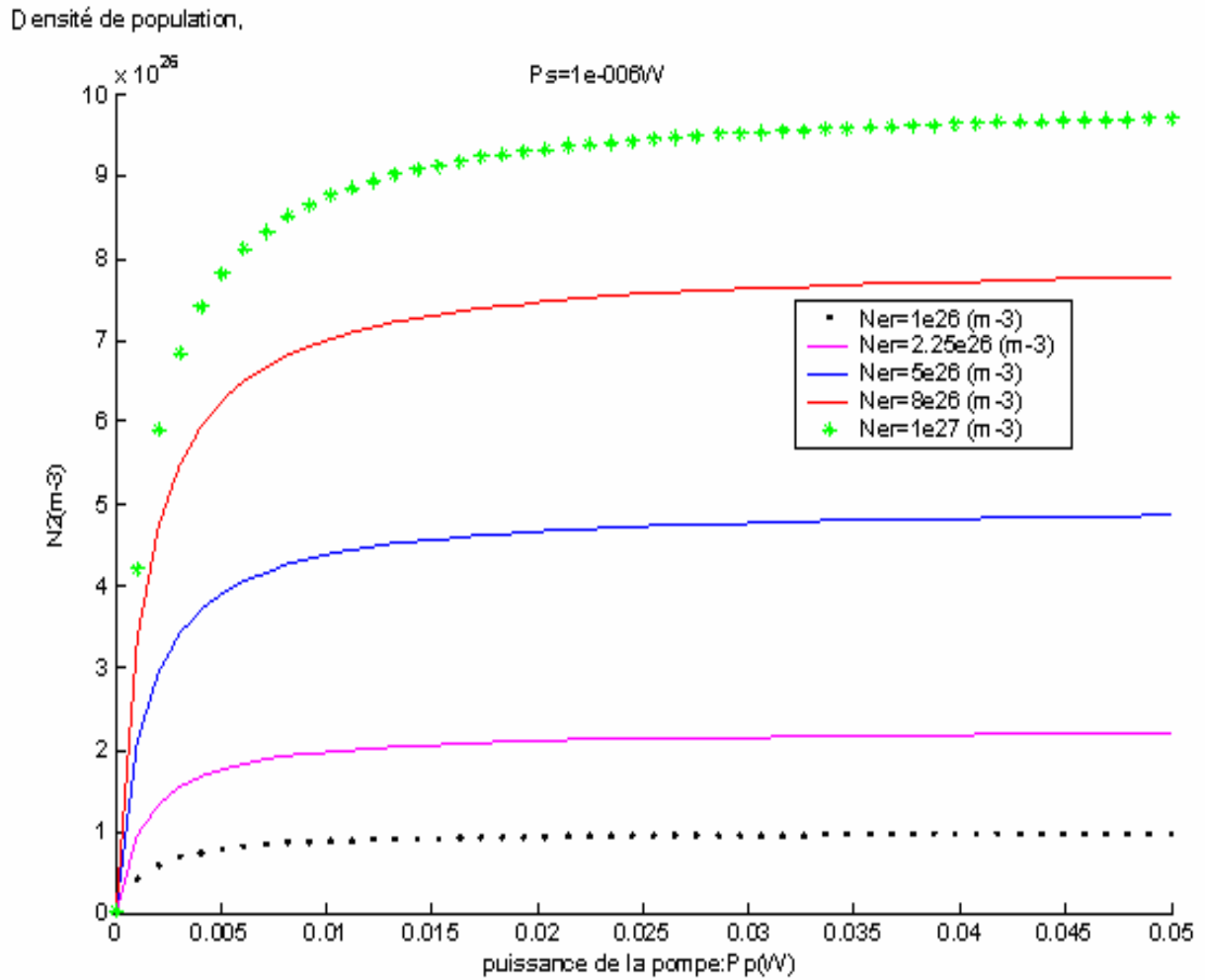


Figure (III-9) : densité de population du niveau métastable,  $N_2$

La figure (III-9) : Variation des densités de populations de l'état métastable  $N_2$  pour différentes concentrations et pour une puissance de pompe jusqu'à 50mW.

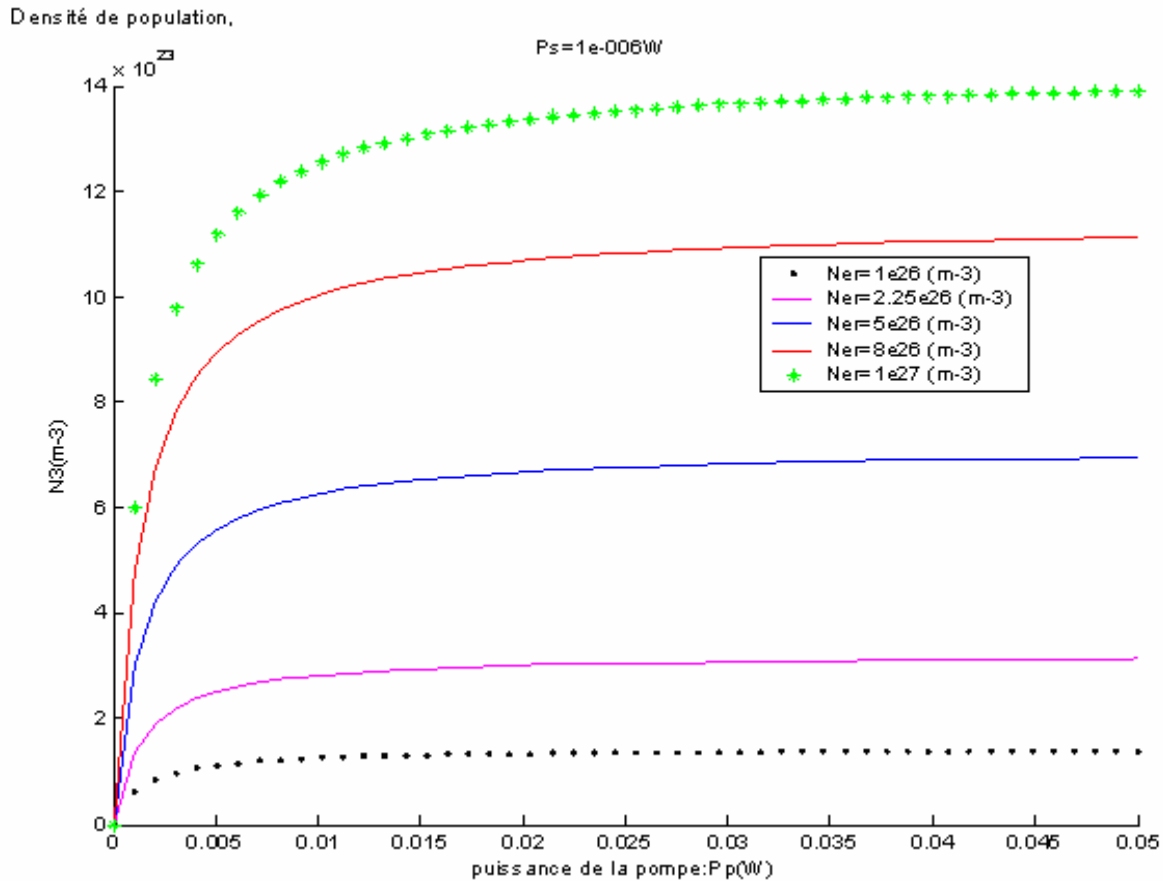


Figure (III-10) : densité de population du niveau intermédiaire,  $N_3$ .

La figure (III-10) : Variation des densités de populations de l'état intermédiaire  $N_3$  pour différentes concentrations et pour une puissance de pompe jusqu'à 50mW.

On montre dans le cas des figures (III-8, III-9, III-10) la réponse du comportement de la transition stimulée des densités de population des états : fondamentale ( $N_1$ ), métastable ( $N_2$ ) et du niveau intermédiaire ( $N_3$ ) en fonction de la puissance de la pompe que l'on maintient jusqu'à 50mW, pour différentes valeurs de concentration d'Erbium ( $N_{Er}$ ) pris entre  $1 \cdot 10^{26} m^{-3}$  et  $1 \cdot 10^{27} m^{-3}$ , car on voit le dépeuplement de l'ensemble de concentration utilisé dans l'état fondamentale ( $N_1$ ) ce qui va être parallèlement le phénomène inverse pour l'ensembles dans l'état intermédiaire ( $N_3$ ) ou il sera peuplé puis dépeuple rapidement (inversion de population)

pour qui il atteint le niveau métastable à cause de la durée de vie qui est très courte par rapport à celle du niveau métastable, ainsi ce phénomène transitoire va presque disparaître lorsqu'on arrive à une puissance de 10mW, et au-delà de 25mW l'ensemble de trois états se stabilise et conserve cette stabilité même si la puissance augmente.

### **IV.3 La Variation du gain en fonction de la puissance de la pompe:**

Un amplificateur optique à base de terre rare (en particulier ce à base d'ions  $\text{Er}^{+3}$  dans les liaisons de télécommunication optique) n'est rien d'autre qu'un laser à fibre sans cavité de résonance. La pompe génère l'inversion de population électronique dans le milieu amplificateur à travers lequel la lumière signal est optiquement amplifiée. Parmi les propriétés qui caractérisent cet amplificateur, il y a le gain qui est un des paramètres essentiels d'un EDFA et il est défini comme le rapport, exprimé en dB, de la puissance de sortie sur la puissance d'entrée à la longueur d'onde d'amplification:

$$\text{Gain} = 10 \times \text{Log}_{10} \left( \frac{P_{out}}{P_{in}} \right) \quad (\text{III-12})$$

Soient  $\phi_p$  et  $\phi_s$  les flux des photons de la pompe d'excitation et du signal définis respectivement comme :

$$\phi_p(x) = \frac{P_p(x)\Gamma_p}{Ah\nu_p} \quad (\text{III-13})$$

$$\phi_s(x) = \frac{P_s(x)\Gamma_s}{Ah\nu_s} \quad (\text{III-14})$$

Avec :  $P_p$  est la puissance de la pompe et  $P_s$  est la puissance de du signal,  $\Gamma_p$  et  $\Gamma_s$  sont les facteurs de confinement pour la pompe et du signal respectivement,  $A$  est la section du faisceau du signal ou pompe, et  $\nu_p$ ,  $\nu_s$  sont la fréquence de la pompe et du signal respectivement.

Comme la relaxation du niveau  ${}^4I_{11/2}$  est plus rapide que la relaxation du niveau  ${}^4I_{13/2}$  dans la silice, nous pouvons considérer le peuplement du niveau  ${}^4I_{13/2}$  comme quasi instantané. Cette hypothèse nous permet de considérer les ions  $\text{Er}^{+3}$  comme un système à deux niveaux.

$$N_T = N_1 + N_2 + N_3 \quad \text{Et} \quad N_3 \ll N_1, N_2 \quad (\text{III-15})$$

Avec :  $N_T$  La densité en ion erbium de la fibre.

$N_1, N_2, N_3$  sont les niveaux fondamental, métastable et intermédiaire des trois premiers niveaux énergétiques respectivement.

Car à l'équilibre on a :

$$dN_1 = dN_2 = dN_3 = 0 \quad (\text{III-16})$$

Nombre de photons du signal :

$$dN_s = A d\phi_s - \sigma_s \phi_s (N_2 - N_1) A dx \quad (\text{III-17})$$

Avec  $\sigma_s, \sigma_p$  sont la section efficace d'absorption et d'émission du signal

$$N_2 - N_1 = \left( \frac{\sigma_p \phi_p - \frac{1}{\tau_{21}}}{\sigma_s \phi_s - \frac{1}{\tau_{21}}} \right) N_T \quad (\text{III-18})$$

Où la formule du gain d'une fibre optique de longueur L est donné par :

$$G = \frac{P_s(L)}{P_0} = \exp[(N_2 - N_1) \sigma_s L] \quad (\text{III-19})$$

On remplace l'équation (III-18) dans l'équation (III-19) on obtient :



$$G = \exp \left[ \left( \frac{\sigma_p \phi_p - \frac{1}{\tau_{21}}}{\sigma_p \phi_p - \frac{1}{\tau_{21}}} \right) N_T * \sigma_s * L \right] \tag{III-20}$$

Et à la fin on en déduit donc l'équation finale du gain qui est :

$$G = 10 * \log_{10} \left( \exp \left[ \left( \frac{\sigma_p \phi_p - \frac{1}{\tau_{21}}}{\sigma_p \phi_p - \frac{1}{\tau_{21}}} \right) N_T * \sigma_s * L \right] \right) \tag{III-21}$$

On relève la variation du gain G en fonction de la puissance de la pompe pour différentes longueurs de la fibre optique amplificatrice L. Les valeurs spectroscopiques sont définies dans le tableau (III-1).

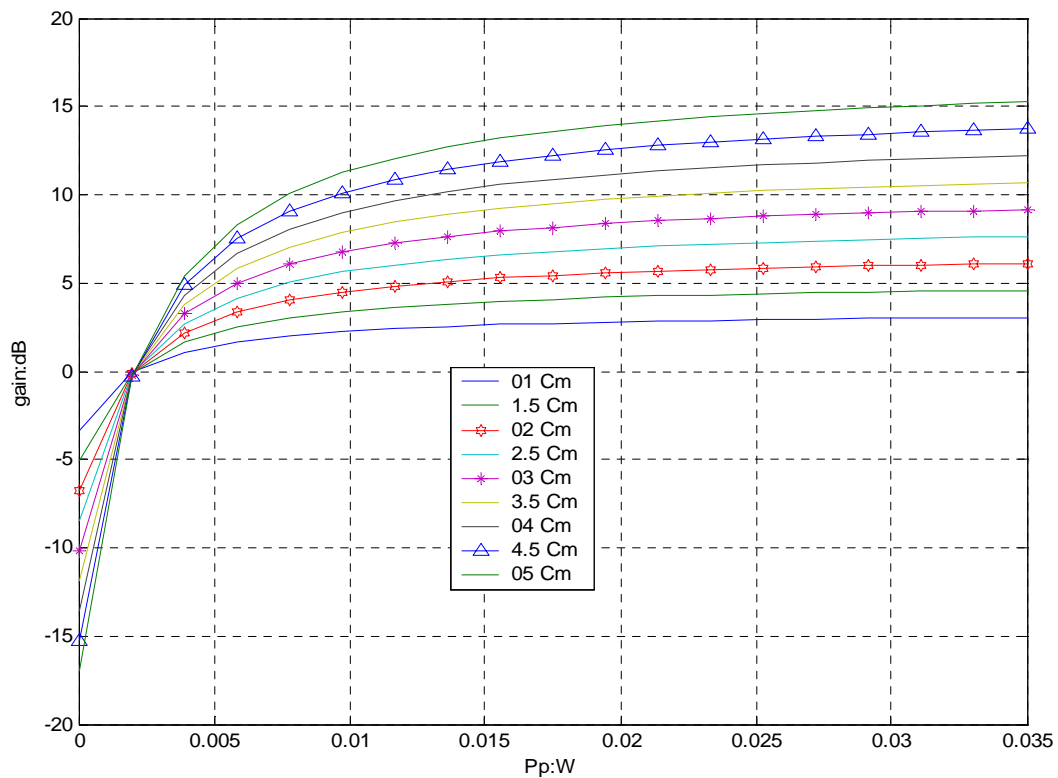


Figure (III-11) : La variation du gain en fonction de la puissance de la pompe jusqu'à 35mW, pour les différentes longueurs L de la fibre guide d'onde.

La figure (III-11) montre la variation du gain ( $G$ ) en fonction de la puissance de la pompe ( $P_p$ ) à différentes valeurs de longueur de la fibre amplificatrice ( $L$ ). Car pour ces différentes longueurs du guide d'onde, le gain augmente d'une façon monotone avec la puissance de la pompe. En outre, nous remarquons que pour les grandes puissances le meilleur gain est obtenu pour des guides d'ondes dont la longueur est relativement grande. Par contre, pour les très faibles puissances ( $< 2\text{mw}$ ) le meilleur gain est obtenu pour les longueurs aux alentours de  $1\text{cm}$ .

### **V Conclusion**

Ce travail de simulation nous a bien montré les différentes variations des caractéristiques de l'amplificateur optique à fibre dopée à erbium. Elles nous ont donné un aperçu sur le choix des paramètres à utiliser pour l'optimisation de l'EDFA, en occurrence la puissance de la pompe et la concentration des ions d'erbium, ainsi que le gain. Ces paramètres sont très importants dans le système de transmission par fibre optique.

Enfin, en pratique les EDFA ont une large bande passante ( $1530\text{-}1560\text{ nm}$ ) pour laquelle le gain est quasiment identique, ce qui rend intéressant ces amplificateurs quand veut amplifier simultanément plusieurs signaux multiplexé en longueurs d'onde.

# *Conclusion Générale*

## Conclusion générale et Perspectives

Cette étude a pour but d'aboutir à une meilleure compréhension de système dopé par des ions d'erbium ( $Er^{+3}$ ) en vue d'améliorer les amplificateurs optiques utilisés dans les télécommunications. Pour cela, nous avons abordé trois volets qui nous ont paru nécessaires : l'état de l'art de la fibre optique conventionnelle, Principe de l'amplification par fibre optique dopée à l'Erbium, modélisation d'une fibre optique dopée Erbium.

Nous avons utilisé un modèle théorique d'amplification dans une fibre optique dopé Erbium. Ce modèle, est basé sur des équations d'évolution des populations des niveaux électroniques des dopants.

Pour résoudre le système d'équation de ce modèle, nous avons effectué la résolution des systèmes d'équation sous MATLAB.

Nous avons commencé notre travail par une étude théorique sur la fibre optique qui nous a permis de décrire sa fabrication et ces différents types, ainsi que les causes de son atténuation. Nous avons aussi mis en évidence les pertes causées par cette dernière en terminant par citer quelques applications et avantages de la fibre optique.

Nous avons montré dans le chapitre 2, que l'utilisation d'ion de terre rares, essentiellement l'erbium avec a fait l'objet de plusieurs études. Les niveaux de transition inter bande amplifient le signal initial à la longueur d'onde de 1550 nm. En outre nous avons assimilé les principes de transition électroniques, ainsi que les transitions non radiatives et radiatives tel que : l'émission spontanée et l'émission stimulée sur laquelle est basée le principe d'amplification optique d'un système à trois niveaux utilisés dans notre étude.

Nous avons présenté dans le chapitre 3 le fruit de notre travail sur la fibre optique dopée à l'erbium (Er). Pour cela, nous nous sommes intéressé donc, à la résolution numérique des équations différentielles des trois premiers niveaux énergétiques : fondamentales (N1), métastable (N2) et intermédiaire (N3) en fonction du temps, en tenant compte des paramètres spectroscopique de notre fibre optique EDFA.

Nous avons pu mettre en évidence premier, une inversion de population, sur les trois premiers niveaux énergétiques utilisés et en particulier sur l'état métastable  $N_3$ . Cette inversion est optimale pour une concentration d'Erbium autour de  $10^{26} \text{m}^{-3}$  et une puissance de pompe de 30mw.

En outre évalue les valeurs du gain, facteur dans le système de transmission à fibre optique en fonction de la puissance de la pompe pour différentes valeurs de la longueur de la fibre.

Nous avons constaté un gain maximum pour une valeur de puissance de pompage de (30mw) et une concentration optimale de  $10^{26} \text{ion} / \text{m}^{-3}$ .

- Enfin on peut dire que cette étude basée sur des simulations nous a permis d'évaluer les paramètres essentiels de la concentration et de la puissance de la pompe et en particulier le gain.

En perspective de ce travail nous comptons étudier l'augmentation du gain en insistant sur le paramètre de la section efficace d'absorption de l'erbium dans le cas d'un co-dopage Erbium /Ytterbium ( $\text{Er}^{+3}/\text{Yb}^{+3}$ ).

En effet l'incorporation de l'erbium près d'un sensibilisateur comme l' $\text{Yb}^{+3}$  à pour effet d'absorber efficacement voir même non sélectivement le rayonnement d'une pompe large bande puis de transférer cette énergie vers les ions erbium.

Dans l'avenir nous avons choisi de développer et analyser la faisabilité des fibres optiques amplificatrices à base du co-dopage de la silice par des  $\text{Yb}^{+3}$  et des ions  $\text{Er}^{+3}$ .

## **Références :**

**[1] Géraldine Dentelle.**

« Vitrocéramiques oxyfluorées transparentes dopées par des ions lanthanides matériaux nano composites luminescents à 1.5  $\mu\text{m}$  », thèse de doctorat, université pierre et marie curie; 09/10/2006, France.

**[2] H. Apithy, Y. Bouslimani et H. Hamam.**

« Limitations causes par la dispersion et les effets non linaires », Faculté d'ingénierie, Université De Moncton, France, 2004.

**[3] Jérôme Laurent.**

« Communications optiques à très haut débit », Examen probatoire, Conservatoire National des Arts et Métiers de Paris Département STIC, France, 03/12/2004.

**[4] Yves MOREAU.**

« Télécommunications optiques », cour de M2, Université Montpellier, Centre nationale de la recherche scientifique, France, 2004.

**[5] Jean Beerens et Denis Morris**

« Complément sur les fibres optiques » : optique et ondes, Cours, université de Sherbrooke faculté de science département de physique, avril 1997, pp.64-71, canada.

**[6] Sobcsak Sonia, le blanc**

«Le laser Applications : lecture et gravure de différents types de CD's », Cours, physique , traduction de la première édition américaine de T. Becherrawy et de Alonso – Finn, « tome 3 Quantum and Statistical Physics », Boeck university, Usa 2003.

**[7] Laurent Baysse.**

« La fibre optique », Cours B11, Transmission des telecommunications-partie2- chapitre5, CNAM, France, le 6 /03/2005.

**[8] Aurélien Bergonze**

“ Etude des lasers accordables à réseaux de Bragg échantillonnés ou à pas variables », Thèse de doctorat, université de havre, France, Décembre 2003.

**[9] Olivier ADAMUS; Johann COPIN Eric; PANETTA**

« Nouvelles technologies réseaux SONET/WDM », Cours de formation pour ingénieurs des mines 2000, filière Informatique et réseaux, France, IR3-2003.

**[10] Bertrand Morasse.**

« Amplificateur à fibre double gaine co-dopée à l'erbium et l'ytterbium : Modélisation et vérification expérimentale », maîtrise (M. Sc.). université Laval Québec, Canada, 2006.

**[11] Dr. Abdelkader TEMMAR**

« Caractérisation de l'amplificateur optique à fibre dopée à l'erbium », Communication, Institut des Télécommunications –Oran, 2004 Algérie.

**[12] Trous sellier Laurent.**

« Contribution à l'étude de l'influence de rayonnement gamma sur des fibres dopées erbium de l'AOFD ». Thèse de Master STPI EEA spécialité électronique, nanostructures, composants et systèmes Alcatel, CME<sup>2</sup> ; CNES (centre nationale d'étude spatiale), centre d'électronique et de micro optoélectronique de Montpellier, 7 juin 2006.

**[13] M. Monerie**

« Les lasers et leurs applications scientifiques et médicales : Fibres optiques dopées et applications » ; article, Centre National d'Etudes des Télécommunications; France.

**[14] M. Antoine AL CHOUEIRY**

« Nano particules de silicium et ions erbium pour l'amplification optique » ; thèse de doctorat ; L'université Claude Bernard - Lyon 1, France , 25 septembre 2007.

**[15] Fabrizio Di Pasquale, Maurizio Zoboli, Marco Federighi, Ilana Massarek .**

“Finite-Element Modeling of Silica Waveguide Amplifiers with High Erbium Concentration”, IEEE journal of quantum electronics, vol. 30, n° 5, may 1994.

**[16] Ion VASILIEF.**

« Guides d'onde canaux amplificateurs en verres de fluorures dopées erbium: spectroscopie et amplification optique » ; Thèse de doctorat ; université Claude Bernard Lyon 1; France 20 novembre 2003.

**[17] Cyrille Varona.**

« Recherche croissance cristalline et caractérisation de nouveaux matériaux pour micro lasers bleu et infrarouge » ; Thèse de doctorat, université pierre et marie curie (parie IV), France, 08/12/2006.

**[18] Yoann Justin.**

« Verres fluorées a base de fluoroindate et fluorogallate pour l'amplification optique : fibres à forte ouverture numérique, guides d'ondes planaires et spectroscopie des ions de terre rare » ; thèse de doctorat ; université du Maine ; France, 7 septembre 2002.

**[19] W. Huang and R. R. A. Syms,**

“Analysis of Folded Erbium-Doped Planar Waveguide Amplifiers by the Method of Lines”, *Journal of Lightwave Technology*, Vol.17, No. 12, pp. 2658-2664 (1999).

**[20] G. N. van den Hoven, R. J. I. M. Koper, A. Polman, C. van Dam, J. W. M. van Uffelen and M. K. Smit,**

“Net optical gain at 1.53  $\mu\text{m}$  in Er-doped  $\text{Al}_2\text{O}_3$  waveguides on silicon”, *Applied Physics Letters*, Vol. 68, No. 14, pp. 1886-1888 (1996).

**[21] Pieter Geert Kik.**

“Energy transfer in erbium doped optical waveguides based on silicon”, full thesis, Institute for Atomic and Molecular Physics, 07 /051972, 2007, Amsterdam The Netherlands.

**[22] Hehlem, cockroft, and gosnell.**

“Spectroscopic proprieties of  $\text{Er}^{+3}$  and  $\text{Yb}^{+3}$  doped silicate and aluminosilicate glasses” *Physical Review B* vol 56, N°15 pp 9302-9318 15 october 1997.



## **Résumé:**

Les ions erbium trivalents ( $Er^{+3}$ ) ont joué un rôle important dans le développement de la technologie des télécommunications optiques dans les dernières années. L'émission des ions  $Er^{+3}$  à  $1.53\mu\text{m}$  est cruciale pour les télécommunications optiques car cette émission correspond au minimum d'atténuation des fibres de silice utilisée pour transporter l'information. Dans ce mémoire nous étudions les performances d'une fibre optique dopée Erbium en fonction des paramètres spectroscopiques expérimentaux. Cette étude est basée sur une modélisation des effets du dopage en fonction de la puissance du signal et de la pompe utilisée. En effet, nous simulons le comportement transitoire des différents niveaux énergétique de l'erbium afin d'évaluer le gain de notre guide d'onde.

## **Abstract:**

The trivalent ions erbium ( $Er^{+3}$ ) played a significant role in the development of the optical telecommunications technology in the last years. The emission of the ions ( $Er^{+3}$ ) with  $1.53\mu\text{m}$  is crucial for optical telecommunications, because this emission corresponds to the minimum of attenuation of the silicate fibers used for transporting the information. In this work, we study the performances of an optical fiber doped Erbium according to the experimental spectroscopic parameters. This study is based on a modelization of the effects of doping according to the signal power and the used pump. Indeed, we simulate the transitory behavior of the various energetic levels of erbium in order to evaluate the gain of our wave guide.

:

(Er<sup>+3</sup>)

mμ 1.53

(Er<sup>+3</sup>)

.

,

.

.

,

.

.