

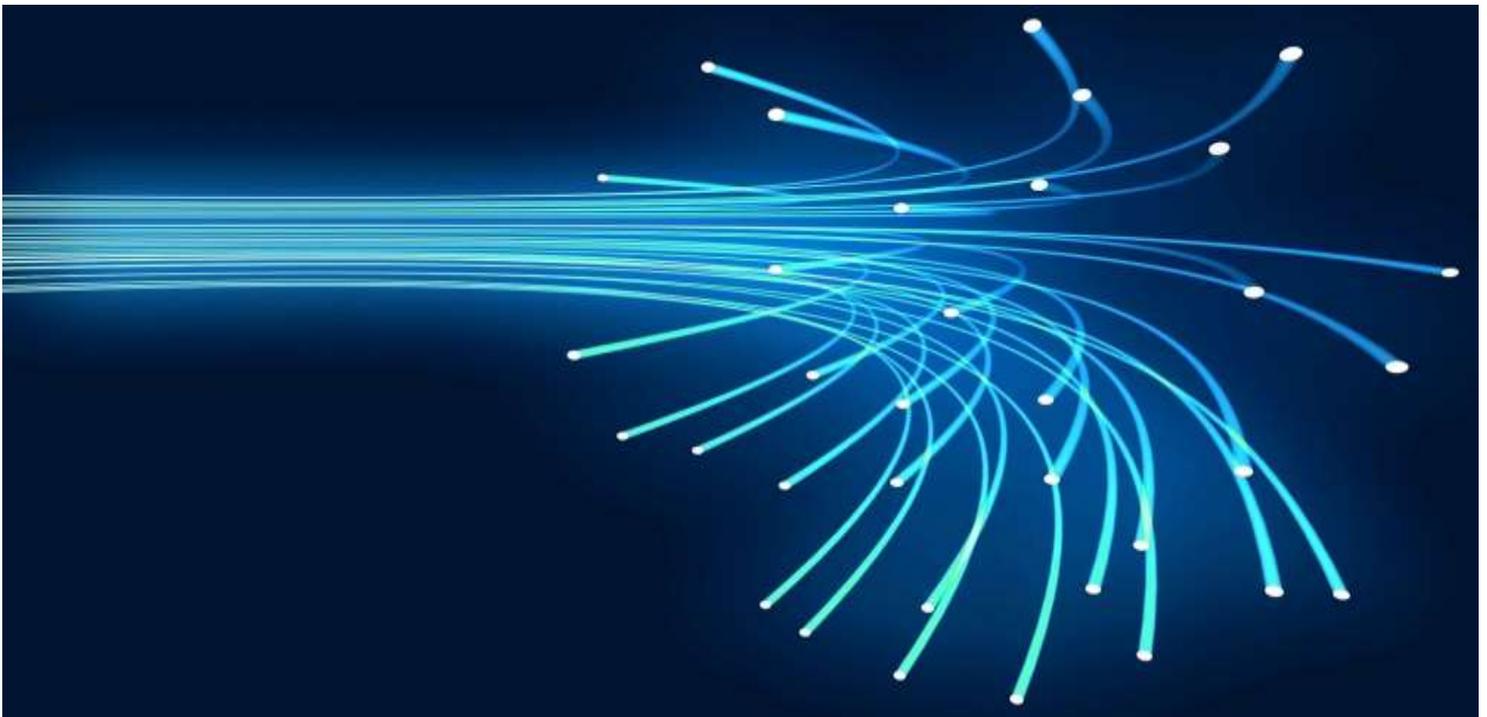
Laboratoire Physique de la Matière Condensée
CNRS-UMR7336_ Université Nice Sophia-Antipolis

Rapport de stage tuteuré en laboratoire

Licence 3 "Physique"

Encadrant: Bernard Dussardier

Caractérisation de Fibres dopées Terres Rares



Projet réalisé par :
Baghriche Mohamed
Salem Sabeur

Sommaire:

I.INTRODUCTION	3
II. Spectroscopie des Terres Rares	4
1/ LES IONS TERRES RARES	
2/ FONCTIONNEMENT D'UN AMPLIFICATEUR OPTIQUE	
A) SYSTEME A DEUX NIVEAUX	
B) SYSTEME A TROIS NIVEAUX	
3/ EQUATION D'EVOLUTION DU SYSTEME A 3 NIVEAUX	
A) EVOLUTION EN REGIME STATIONNAIRE	
B) EVOLUTION EN REGIME NON-STATIONNAIRE	
III. MODELISATION D'UNE FIBRE OPTIQUE DOPEE ERBIUM	7
1/ DESCRIPTION D'UNE FIBRE OPTIQUE	
A) STRUCTURE D'UNE FIBRE	
B) FIBRE MONOMODE : APPROXIMATION GAUSSIENNE	
2/ CARACTERISATION D'UNE FIBRE OPTIQUE DOPEE ERBIUM	
A) FACTEUR DE RECOUVREMENT	
B) DUREE DE VIE	
C) LE GAIN	
D) PUISSANCE DE SATURATION	
CONCLUSION	9
REMERCIEMENTS	10
REFERENCES	10

INTRODUCTION :

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

C'est notamment depuis les années 1966 que les chercheurs Kao et Hockman ont pu développer l'activité de recherche sur les fibres optiques à base de silice et ainsi permettre la réalisation des premières fibres optiques à faibles pertes ($>20\text{dB/Km}$) dans l'infrarouge [1].

Jusqu'au début des années 1990 l'amplification du signal pour les fibres longues distances étaient réalisées par des dispositifs optoélectroniques qui nécessitaient une conversion électrique-optique en entrée et optique-électrique en sortie ce qui limitait le débit d'information à 2 Gbit/s [2]. C'est ainsi que des chercheurs de Southampton et de Bell Laboratories ont mis au point une technique qui consiste à régénérer les signaux au cœur même de la fibre par le biais de l'amplification optique par émission stimulée [3]. C'est à partir de cet instant que les amplificateurs optiques dopés à l'erbium (EDFA) ont fait leurs apparitions, les ions erbium incorporés dans les fibres permettaient de pouvoir transmettre simultanément des signaux à différentes longueurs d'ondes, ce qui donne la possibilité aux fibres de propager un débit d'information de 10000Gbit/s.

Motivation:

Le principe de notre projet est de pouvoir déterminer les caractéristiques d'une fibre optique dopée aux ions terres rares tel que **la puissance de saturation**, **la durée de vie** et **la section efficace d'absorption** afin de concevoir des amplificateurs optiques qui nous permettrons de répondre à la demande des différents secteurs d'activités (médecine, aéronautique, télécommunications...).

Ce rapport s'appuie sur les cours que nous a dispensé Mr Bernard Dussardier au cours du semestre. Il ne comportera qu'une partie de l'aspect théorique de notre projet. Nous exploiterons les résultats expérimentaux ainsi que la définition d'une fibre optique dans sa globalité grâce au site internet que nous avons réalisé.

Durant ce stage nous avons traité le cas d'une fibre monomode dopée aux ions erbium. La partie théorique développer lors de ce rapport nous permettra de pouvoir la confronter aux mesures expérimentales que nous avons réalisées.

La première partie de ce rapport, sera consacré à la spectroscopie des ions erbium (système à niveaux d'énergie discret) puis à la mise en place d'équations qui traduisent l'évolution des populations pour chaque niveau d'énergie.

Dans une deuxième partie nous présenterons brièvement la définition d'une fibre optique et la notion de mode optique, puis nous introduirons certaines grandeurs qui caractérisent une fibre optique dopée à l'erbium.

II. Spectroscopie des Terres rares:

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

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

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

1/ Les ions Terres Rares:

Les Terres rares sont une famille de 15 éléments représentant le groupe des lanthanides.

Le choix de ces ions pour les amplificateurs est du à leurs configuration électronique, en effet la sous couche 4f interne est responsable des propriétés optiques des ions terres rares [4]. Parmi ces ions, celui le plus couramment utilisé pour les télécoms est l'ion Er^{3+} .

Cet ion est utilisé comme dopant dans les amplificateurs à fibres, car à la longueur d'onde de 1,55 μm correspond un minimum d'atténuation des fibres de silice et d'autre part, les électrons issus des niveaux d'énergie de la couche 4f provoquent des émissions radiatives autour de 1,55 μm [5].

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

2/ Transitions entre niveaux d'énergie:

a) Système à deux niveaux: (voir figure 1a)

Il existe 3 types de transitions entre les niveaux d'énergie.

- **L'absorption :**

Soit un rayonnement électromagnétique incident d'énergie résonante $E_2 - E_1 = h\nu$. L'atome, initialement dans un état d'énergie E_1 , passe alors dans un état d'énergie supérieure $E_2 > E_1$. Les électrons qui sont dans l'état fondamental vont absorber la lumière incidente ce qui va les amener dans un niveau d'énergie supérieur, on dit que les électrons sont dans un état excité.

Soit N_1 représentant la population d'électron du niveau fondamental et N_2 la population du niveau excité.

On définit le taux de transition entre les deux niveaux w_{12} en (s^{-1}) pour une longueur d'onde particulière tel que :

$$w_{12} = \frac{\sigma_{12} \cdot I}{h\nu} \quad (1)$$

Avec I : l'intensité du faisceau arrivant (en $W \cdot m^{-2}$).

σ_{12} : La section efficace d'absorption (en m^2).

La section efficace d'absorption σ_{12} représente le taux d'absorption et le nombre de photons par unité de surface et par unité de temps.

- **Emission stimulée:**

Ce phénomène est le processus inverse de l'absorption. Elle a pour taux de transition :

$$w_{21} = \frac{\sigma_{21} \cdot I}{h\nu} \quad (2)$$

Avec σ_{21} : La section efficace d'émission en (m^2).

- **Désexcitation spontanée:**

- Radiative:

L'électron passe de façon spontanée (c'est à dire sans aucune influence extérieure) d'un niveau d'énergie supérieur E2 à un niveau inférieur E1.

En retombant dans son état fondamental, l'électron émet un photon d'énergie $h\nu = E_2 - E_1$. Cette émission lumineuse est appelée fluorescence.

- Non radiative:

Cette transition se passe comme celle vue au-dessus sauf que lorsque l'électron arrive sur le niveau fondamental, il n'émet aucun photon.

On peut définir ici le taux d'émission spontanée A_{21} en (s^{-1}) qui est inversement proportionnel à la durée de vie du niveau excité (figure 1):

$$A_{21} = \frac{1}{\tau} \quad (3)$$

Avec τ : la durée de vie du niveau excité en (s).

b) Système à trois niveaux : (voir figure 1b)

Il n'est pas possible d'avoir en réalité un système à deux niveaux d'énergie car cela nécessite que les sections efficaces d'absorption et d'émission doivent être égaux. Pour cela il faut introduire un système à 3 niveaux d'énergie.

Prenons le cas de l'ion Erbium.

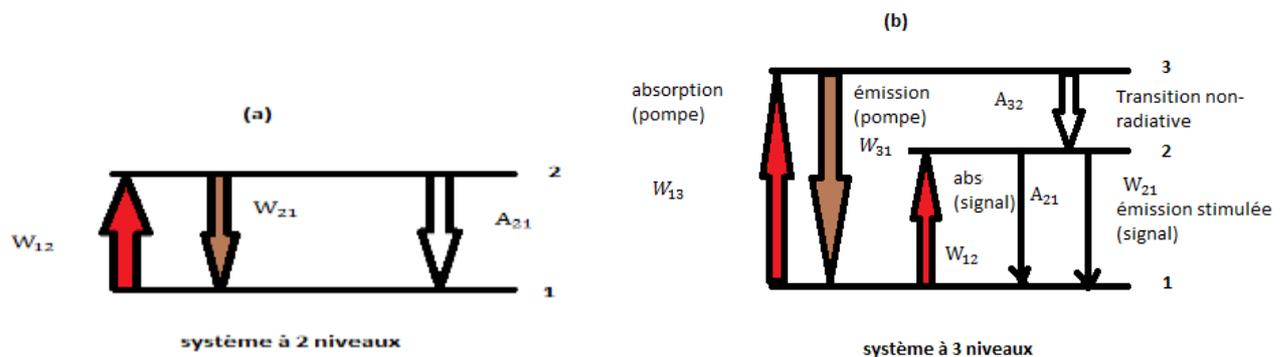


Figure1: Transitions entre niveaux d'énergie

On peut observer sur la figure 1b :

- l'état (1) représente le niveau fondamental
- l'état (2) le niveau métastable
- l'état (3) le niveau excité (ou niveau de pompe)

Pour amener les électrons d'un niveau fondamental à un niveau d'énergie haut (3) il faut effectuer un pompage optique par l'intermédiaire d'une diode laser de pompe à 980nm ce qui va induire un phénomène d'absorption et permettre d'apporter suffisamment d'énergie.

Ainsi les électrons se trouvent dans un niveau excité pendant une période extrêmement courte pendant laquelle ils vont subir une transition non radiative très rapide (sans émission de photon) vers un niveau (2) métastable.

Etant donné que ce niveau à une grande durée de vie par rapport au niveau (3), un grand nombre d'électrons vont pouvoir s'accumuler sur cet état et si la pompe est suffisamment intense, il y aura d'avantage d'électrons dans le niveau (2) que dans le niveau fondamental (1).

C'est par ce processus que s'effectue l'inversion de population. Donc à l'arrivée d'un photon incident (photon provenant du signal) le phénomène de l'émission stimulée se produira ce qui donnera naissance à un second photon identique au premier et ainsi de suite, dès lors notre signal est amplifié.

3/ Equation d'évolution du système à 3 niveaux:

Cette modélisation nous permet d'identifier les différents paramètres pouvant définir les grandeurs caractérisant notre fibre dopée erbium.

a) Evolution en régime stationnaire :

Comme nous l'avons mentionné précédemment, plusieurs mécanismes se produisent lorsqu'un rayonnement vient interagir avec les ions erbium (absorption, transition non-radiative, émission, ...). Ces phénomènes vont influencer la population d'électron issue de chaque niveau d'énergie ce qui génère des équations de populations.

Soient N_1 , N_2 et N_3 les populations des niveaux 1 (resp 2 et 3) et N_t la population totale. Ainsi nous avons les équations d'évolutions des populations suivantes :

$$N_t = N_1 + N_2 + N_3 \quad (4)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = N_1 \cdot W_{12} - N_2 \cdot W_{21} - N_2 \cdot A_{21} + N_3 \cdot A_{32} \quad (5)$$

$$\frac{dN_3}{dt} = N_1 \cdot W_{13} - N_3 \cdot W_{31} - N_3 \cdot A_{32} \quad (6)$$

Dans un amplificateur, l'évolution des populations dans les niveaux d'énergie atteignent un régime stationnaire ($W_{13} \neq 0$ pour $t < 0$), donc les dérivées temporelles de N_2 et N_3 sont nulles. En faisant les approximations $A_{32} \gg W_{13}$, $W_{13} \simeq W_{31}$ on obtient:

$$\frac{dN_3}{dt} = 0 \quad \Leftrightarrow \quad N_1 \cdot W_{13} - N_3 \cdot A_{32} = 0 \quad (7)$$

$$\Leftrightarrow \quad N_3 = N_1 \cdot \frac{W_{13}}{A_{32}} \quad (8)$$

Donc $N_1 \gg N_3$

$$N_t \simeq N_1 + N_2 \quad (9)$$

On peut négliger N_3 dans l'expression de N_t car la durée de vie du niveau 3 de l'erbium (de l'ordre de 10 μ s) est très petite devant la durée de vie des autres niveaux.

$$\frac{dN_2}{dt} = N_1 \cdot W_{12} - N_2 \cdot W_{21} - N_2 \cdot A_{21} + N_1 \cdot W_{13} = 0 \quad (10)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = 0 \quad \Leftrightarrow \quad N_2 = \frac{N_t \cdot (W_{12} + W_{13})}{W_{21} + W_{12} + A_{21} + W_{13}} \quad (11)$$

Si nous posons comme grandeurs adimensionnées:

- $s_a = \frac{W_{12}}{A_{21}}$, le signal normalisé absorbé.
- $s_e = \frac{W_{21}}{A_{21}}$, le signal normalisé émis.
- $p = \frac{W_{13}}{A_{21}}$, ou encore $p = \frac{P_p}{P_{sat}}$, la puissance de pompe normalisée
- $n_2 = \frac{N_2}{N_t}$, la population N_2 normalisée.

L'expression de n_2 sous sa forme générale s'écrit donc:

$$n_2 = \frac{s_a + p}{1 + p + s_a + s_e} \quad (12)$$

Dans la suite, nous ferons l'hypothèse que le signal est négligeable devant p ($s_a, s_e \ll p$). Ainsi pour décrire la fluorescence, n_2 s'écrira:

$$n_2 = \frac{p}{1+p} \quad (13)$$

Expérimentalement nous n'avons pas de moyen pour mesurer directement n_2 , donc pour cela nous mesurerons la puissance de la fluorescence qui est proportionnelle à n_2 .

b) Evolution en régime non-stationnaire :

Pour mesurer la durée de vie nous devons exciter les électrons puis couper la diode laser à l'instant $t=0$ afin d'observer la désexcitation des électrons du niveau 2 vers le niveau fondamental. Le taux d'absorption $W_{13} \neq 0$ pour $t < 0$. Nous reprendrons les approximations faites dans la section précédente. L'état du niveau 2 est non stationnaire donc la population du niveau 2 dépend du temps. Réécrivons l'équation (10) en absence du signal :

$$\frac{dN_2}{dt} = -N_2 \cdot A_{21} + N_1 \cdot W_{13} \quad (14)$$

D'où l'évolution du niveau 2 après coupure de la pompe s'écrit:

$$\frac{dN_2}{dt} = -N_2 \cdot A_{21} \quad (15)$$

Si à l'instant $t=0$ la population du niveau 2 vaut $N_2(0)$ et comme $A_{21} = \frac{1}{\tau}$, elle vaut à l'instant t :

$$N_2 = N_2(0) \cdot \exp(-t/\tau) \quad (16)$$

Ou encore

$$n_2 = n_2(0) \cdot \exp(-t/\tau) \quad (17)$$

Cette expression nous informe que la population du niveau N_2 suit une loi de décroissance exponentielle, elle nous permettra de vérifier expérimentalement si ce modèle correspond à la réalité.

III/ Modélisation d'une fibre optique dopée erbium

Dans cette partie, nous aborderons les notions importantes qui caractérisent un amplificateur ainsi que la description d'une fibre optique.

1/ Description d'une fibre optique:

a) Structure d'une fibre :

Une fibre optique est un composant cylindrique constitué d'un cœur ($8\mu m$ de diamètre), d'une gaine ($125\mu m$) et d'un revêtement en plastique ($250\mu m$). Voir **figure 2**.

Le cœur et la gaine sont constitués de silice et ont pour indice de réfraction n_c (resp. n_g). C'est au cœur de la fibre où se propage la lumière, ainsi pour permettre cette propagation on doit satisfaire la condition $n_c > n_g$ (loi de la réfraction).

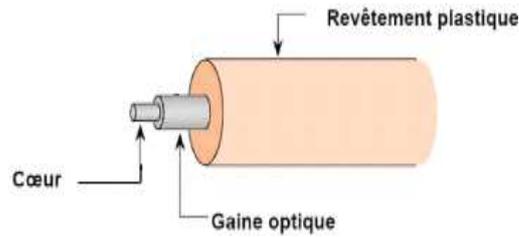


Figure 2 : Composition d’une fibre optique

<http://www.memoireonline.com/03/11/4355/Dynamique-non-lineaire-du-pulse-dans-une-fibre-optique1.png>

b) Fibre monomode: Approximation gaussienne.

Le mode indique la manière dont se propage la lumière au sein du cœur. Comme son nom l’indique, dans une fibre monomode il y a qu’un seul mode de propagation, on approxime généralement ce mode par une gaussienne. Dès lors nous pouvons écrire le profil d’intensité du mode comme étant :

$$I(r) = I(0)\exp(-2.r^2/\omega^2) \tag{18}$$

Où ω est le rayon du mode gaussien et r le rayon.

2/ Caractéristique d’une fibre optique dopée à l’erbium:

Pour déterminer les performances d’une telle fibre on utilise des paramètres tels que :
Le recouvrement, la durée de vie, le gain, la puissance de saturation et la section efficace d’absorption.

a) Facteur de recouvrement:

Lors de la phase de dopage, une certaine concentration d’ions erbium est incorporée dans le cœur de la fibre. Cependant cette concentration en ions n’occupe pas forcément toute la surface du cœur. Nous définissons donc le recouvrement Γ comme étant la partie du profil d’intensité qui interagit avec la zone dopée (voir figure 3). Elle se déduit à partir de l’équation (18) comme :

$$\Gamma \propto \iint_{\infty} r dr d\theta . I(r) . D(r) \tag{19}$$

Avec $D(r)$ la fonction de distribution des dopants.

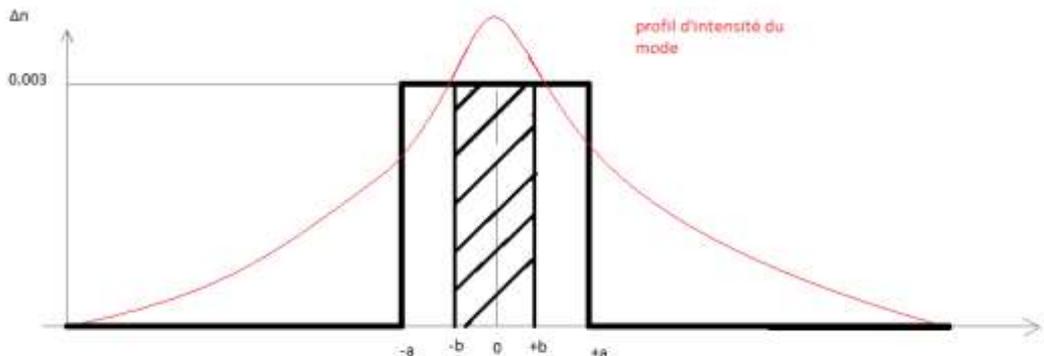


Figure3 : représentation du profil d’intensité du mode

Nous avons représenté en abscisse le rayon et en ordonnée la différence d’indice Δn entre la gaine et le cœur. La zone dopée est la partie hachurée.

Le facteur de recouvrement a pour expression numérique:

$$\Gamma = 1 - \exp(-2 \cdot b^2 / \omega^2) \quad (20)$$

Avec b : Rayon de la zone dopée

Nous retrouverons ce facteur dans l'expression de la puissance de saturation. En effet, le rayon du mode est un paramètre qui influe directement sur le recouvrement, si le profil d'intensité est large, nous aurons un fort coefficient de recouvrement.

b) La durée de vie:

Le temps de vie τ d'un électron dans un niveau d'énergie correspond à la durée durant laquelle l'électron est présent dans ce niveau avant qu'il se désexcite vers son niveau fondamentale. La durée de vie est une grandeur importante car elle permet de réaliser l'inversion de population, elle est de l'ordre de 10ms.

c) Le gain:

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

$$G = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{P_e}{P_s} \right) \quad (21)$$

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

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

$$G = \int_0^L g \cdot dz \quad (22)$$

Avec

$$g = N_t \cdot (n_2 \cdot \sigma_e - n_1 \cdot \sigma_a) \cdot \Gamma \quad (23)$$

d) Puissance de saturation de la pompe:

La puissance de saturation de la pompe est définie comme la puissance pour laquelle la population N_2 du niveau 2 soit égale à la population N_1 du niveau fondamental pour une longueur d'onde et une distance z données.

À cette puissance le milieu est dit transparent, il y a autant de probabilité d'avoir un photon émis que absorbé ($g = 0$) pour une longueur d'onde telle que $\sigma_e = \sigma_a$ (i.e. vers 1530 nm).

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

$$P_{sat} = \frac{\hbar \cdot \nu_p \cdot S}{\sigma_a \cdot \tau \cdot \Gamma} \quad (24)$$

Avec h : la constant de Planck.

σ_a : La section efficace d'absorption de la pompe.

τ : La durée de vie du niveau 2

Γ : Le recouvrement

ν_p : La fréquence de pompe

S : la surface de la zone dopée.

Conclusion:

Nous avons dans ce rapport explicité la partie théorique de notre projet. En guise de conclusion et afin de voir la cohérence avec les modèles théoriques développés plus haut, nous introduisons quelques résultats expérimentaux pour la mesure de la puissance de saturation et de la durée de vie. Le protocole expérimental sera détaillé dans notre site internet.

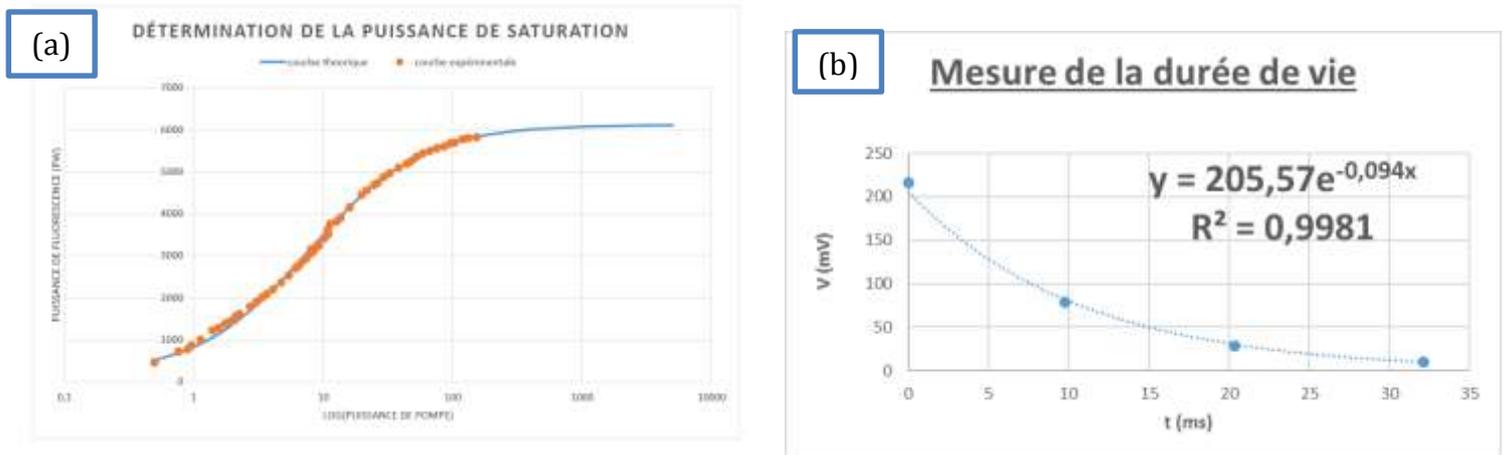


Figure4: Mesures de la puissance de saturation et la durée de vie.

- **Commentaires :**

Nous avons représenté sur la première courbe (**figure 4a**) en échelle logarithmique la puissance de fluorescence en fonction de la puissance de pompe. Les points expérimentaux en disque plein, ont été ajustés par rapport au modèle en trait plein qui a pour équation (13). Elle nous permet de voir comment évolue la population du niveau 2. En effet nous observons qu'à partir d'une certaine puissance d'entrée le niveau est saturé d'ions erbium.

Le fait d'ajuster la courbe expérimentale au modèle nous a permis de déterminer la puissance de saturation de la pompe qui est de 7.8 mW.

La deuxième courbe (**figure 4b**) représente la désexcitation des ions erbium du niveau 2 vers le niveau fondamental. Elle correspond bien au modèle que nous avons mis en place précédemment sachant que N_2 et V sont régis par la même équation (16). A partir de ce graphe nous avons déduit une durée de vie de 10,7 ms.

Remerciements:

Nous souhaiterions tout d'abord remercier Mr. Fabrice Mortessagne pour nous avoir accueilli au laboratoire (LPMC) pendant ce stage.

Nous voudrions tout particulièrement remercier Mr. Bernard Dussardier pour son investissement personnel et constant durant toute la durée du stage.

Nous tenons également à remercier Mr. Wilfried Blanc et Mr. Jean-François Lupi pour leur implication pendant nos expériences.

Références:

- [1] Carole Meunier, thèse de recherche, page 14 à 25, 1988
- [2] <http://epublications.unilim.fr/theses/2003/maury-julien/maury-julien.pdf>
- [3] Basile Faure, thèse de recherche, page 7 à 45, 2005.
- [4] <http://softs.polytechnique.fr/departements/physique/seminaires/100121.pdf>
- [5] <http://www.udppc.asso.fr/national/index.php/component/content/article/40/414-lanthanides-presentation>