

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

*Randriana N.H.E<sup>1</sup>, Randriamitantsoa P.A.<sup>2</sup>*

Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo

Ecole Doctorale en Science et Technique de l'Ingénierie et de l'Innovation (ED – STII)

Laboratoire de Recherche - Télécommunication, Automatique, Signal et Images (TASI)

*Erica\_mada@hotmail.com<sup>1</sup>, rpauguste@gmail.com<sup>2</sup>*

### RESUME

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

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

### ABSTRACT

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

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

## 1. Introduction

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

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

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

## 1. Concept EDFA

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

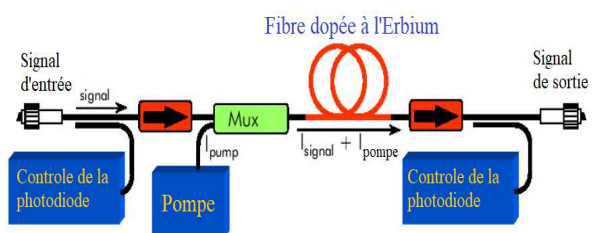


Figure 1 : Amplificateur à l'erbium

## 2. Affaiblissement

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

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

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

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

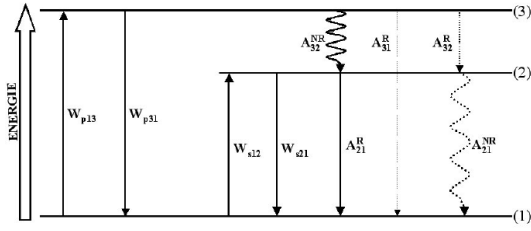
**Tableau 1 :** Comparatif de l'atténuation kilométrique des fibres optiques SMF (Single Mode Fiber) et MMF (Multi Mode Fiber).

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

## 3. Recherche de l'équation du gain

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

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



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

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

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

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

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

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

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

Ainsi les équations d'évolution des populations d'un système à deux niveaux sont le point de départ de la modélisation d'un amplificateur optique à fibre dopée à l'erbium, pour notre cas nous avons négligé le niveau  $N_3$ . Nous obtenons alors le

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

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

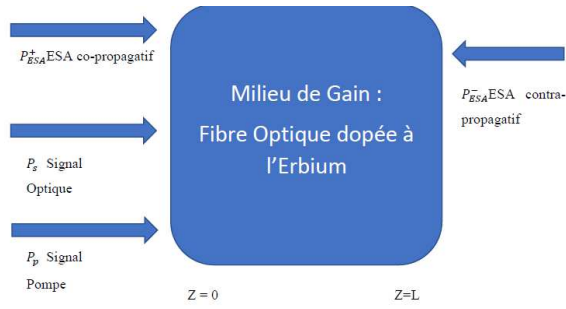
Avec :

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

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

du signal à la longueur d'onde amplifiée

( $P_s$ ).



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

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

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

Où

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

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

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

Pour la résolution du système nous prenons comme condition initiale :

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

En appliquant sur l'évolution longitudinale :

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

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

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

Soit le gain se définit par :

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

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

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

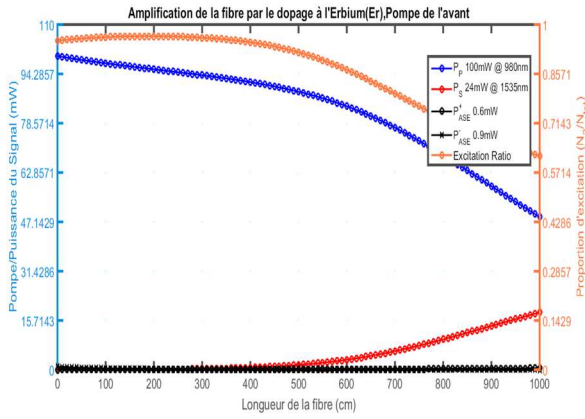
Nous en déduisons alors l'expression de l'équation du gain :

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

- a) Etude du 1<sup>er</sup> Cas où  $P_p=100$  mW et  $\lambda = 980$ nm

Paramètres de l'amplificateur

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

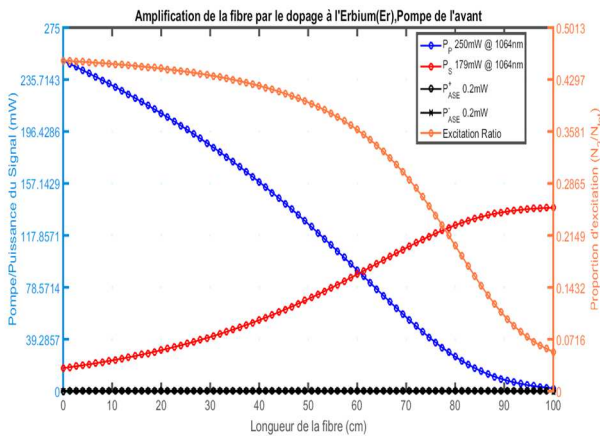


**Figure 4 : Modélisation pour  $P_p=100$  mW et  $\lambda=980$ nm**

b) 2<sup>ème</sup> Cas où  $P_p=250$  mW et  $\lambda = 1064$ nm

Paramètres de l'amplificateur

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



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

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

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

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

Le gain est étroitement lié à  $\Gamma_p$  et  $\Gamma_s$  mais l'influence de ces paramètres n'est pas explicitement donnée par l'équation du gain.

#### 5. Conclusion

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

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

## 6. Bibliographie

[1] B. Le Nguyen, « *Optical Fiber Communication Systems with MATLAB and Simulink Models* », International Standard Book, Huawei Technologies, First edition, p200-360, 2015.

[2] B. Le Nguyen, « *Optical Fiber Communication Systems with MATLAB and Simulink Models* », International Standard Book, Huawei Technologies, Second edition, p355-401, 2017.

[3] B. Le Nguyen, « *Ultra-fast fiber laser* », International Standard Book, Huawei Technologies, Second Edition, p300-420, 2017.

[4] B. J. Eggleton, T. Stephens, P. A. Krug, G. Z. Dhosy, Brodzeli, F. Ouellette, « *Dispersion compensation using a fibre grating in transmission* », Electronics Letters, vol. 32, n°17, p1610-1611, 2016.

[5] E. Desurvire, « *Erbium-doped fiber amplifiers, principles and applications* », édition Wiley Interscience, 2010.

[6] K. Takiguchi, K. Okamoto, K. Moriwaki, « *Planar lighthwave circuit dispersion equalizer* », Journal of Lighthwave Technology, vol. 14, n°9, p2003-2011, 2010.

[7] K. Takiguchi, S. Kawanishi, H. Takara, A. Himeno, K. Hattori, « *Dispersion slope equaliser for dispersion shifted fiber using a lattice-form programmable optical filter on a planar lighthwave circuit* », Journal of Lighthwave Technology, vol. 16, n°9, p1647- 1656, 2011.

[8] M. Shirasaki, « *Chromatic dispersion compensator using virtually imaged phased array* », IEEE Photonics Technology Letters, vol. 9, n°12, p1598-1600, 2010.