

ÉTUDE ET OPTIMISATION DES DIFFÉRENTS PARAMÈTRES D'UN AMPLIFICATEUR À FIBRE OPTIQUE DOPÉE AUX IONS DE TERRES RARES

Badreddine BOUBIR, A. EL-AKRMI et H. TRIKI

*Laboratoire de Physique des Rayonnements, Département de Physique, Faculté des Sciences,
Université Badji Mokhtar – Annaba, 23000 Annaba*

E-mail : boubir11@gmail.com

RÉSUMÉ : Dans cette étude, une des caractéristiques les plus importantes de l'amplificateur à fibre dopée Erbium (EDFA), le gain, est simulé et analysé par un programme écrit dans un environnement Matlab. Les résultats de simulation prouvent que le gain d'EDFA est affecté par certains paramètres tels que la longueur de fibre, la longueur d'onde de pompe, la puissance de pompe, la densité des ions d'Erbium et la géométrie de la fibre optique (le rayon du cœur).

MOTS-CLÉS : amplificateurs à fibres optiques, EDFA, télécommunications optiques, fibre optique dopée terres rares

1. Introduction

Un des facteurs les plus importants limitant la distance de transmission dans les systèmes de télécommunication optiques à fibres est la perte de puissance du signal optique provoquée par la dispersion et l'absorption dans le guide d'onde [1]. Au début, des répéteurs électriques, qui exigent la conversion du signal optique en un signal électrique, ont été utilisés pour compenser la perte de puissance. L'utilisation de tels répéteurs dans les télécommunications optiques ont rendu les systèmes de transmissions plus complexes et par voie de conséquence ont augmenté leurs coûts d'installation. A partir de 1990, les amplificateurs optiques (Raman, Brillouin, fibres optiques dopées terres rares), on permet d'amplifier directement le signal optique sans passer par la conversion électrique-optique.

Les amplificateurs à base de fibres optiques dopées aux ions terres rares sont les plus utilisées car ils peuvent fonctionner à des longueurs d'ondes spécifiques allant du visible jusqu'à l'infrarouge moyen, tout dépend de l'ion terre rare utilisé (Er^{3+} , Ho^{3+} , Pr^{3+} , Yb^{3+} , Nd^{3+}). Cependant l'élément le plus intéressant indiqué ci-dessus est l'Erbium (Er^{3+}) à cause de son émission situé dans la bande conventionnelle dite bande C (1525 – 1565nm) ou l'atténuation du signal est minimale dans les fibres en silice utilisées actuellement dans les systèmes de transmissions optiques à haut débit (Terabits).

2. Théorie et modélisation

2.1. Théorie

Les amplificateurs à fibres dopées Erbium reposent sur deux principes fondamentaux, l'absorption et l'émission stimulée, qui sont à la base de l'amplification optique. Ces deux phénomènes se produisent au niveau du cœur de la fibre dopée. La configuration énergétique de l'Erbium dans la silice (Figure.1) procure un environnement type pour l'amplification optique i.e., présence d'un niveau métastable. Les électrons présents dans le niveau fondamental ($^4\text{I}_{15/2}$) absorbent l'énergie provenant du pompage (Diode laser émettant à 980) pour peupler un niveau supérieur ($^4\text{I}_{11/2}$) (on parle d'inversion de population), étant donné que

ce dernier a une durée de vie très courte, les électrons excités retombent à un niveau qui a une durée de vie plus longue, c'est le niveau métastable. Sous l'effet du signal à amplifier ces électrons se dés excitent en émettant des photons identiques à celui-ci.

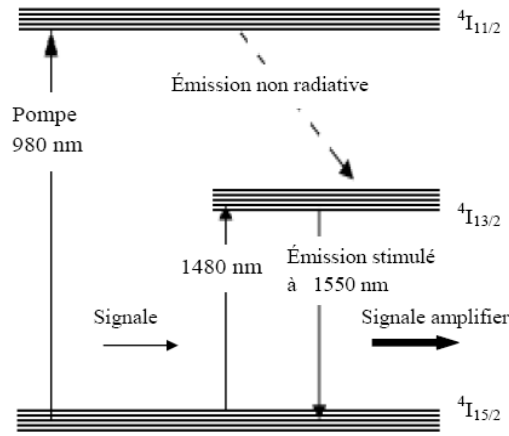


Figure.1 : Niveaux énergétiques et phénomène d'amplification.

2.2. Modélisation

Comme on peut le voir dans la figure.1 quant on pompe à 980 nm, trois niveaux d'énergies interviennent dans l'amplification, il y a alors trois équations d'inversion de population. Mais, étant donné que le niveau supérieur $4I_{11/2}$ a une durée de vie très courte par rapport à celle du niveau métastable ($4I_{13/2}$) [2], on obtient un système à deux équations. Signalons que le même système est obtenu pour un pompage à 1480 nm.

$$\frac{dN_1}{dt} = -(R + W_a) \cdot N_1 + \left(W_s + \frac{1}{\tau}\right) \cdot N_2 \quad (1)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = (R + W_a) \cdot N_1 - \left(W_s + \frac{1}{\tau}\right) \cdot N_2 \quad (2)$$

$$\text{avec :} \quad N_{\text{total}} = N_1 + N_2 \quad (3)$$

où :

$$R = \sigma_p^a \cdot I_p / h \cdot \nu_p$$

$$W_a = \sigma_s^a \cdot I_s / h \cdot \nu_s$$

$$W_s = \sigma_s^e \cdot I_s / h \cdot \nu_s$$

τ : temps de vie du niveau métastable.

h : constante de Planck.

$\nu_{s,p}$: Fréquence du signal et pompe respectivement.

$I_{s,p}$: intensité du signal et pompe respectivement.

$\sigma_{s,p}^a$: Section efficace d'absorption du signal et pompe respectivement.

σ_s^e : Section efficace d'émission du signal.

où N_1 et N_2 sont les taux de populations des niveaux fondamental ($4I_{15/2}$) et métastable respectivement (ions.cm⁻³), R , W_a et W_s sont les taux de transitions de pompe, d'absorption stimulé et d'émission stimulé respectivement (s⁻¹).

L'évolution de l'intensité du pompage et du signal dans la fibre est donné par :

$$\frac{dI_p(z)}{dz} = -\alpha_p \cdot I_p(z) - I_s(z) \cdot (1 - N_2) \cdot \sigma_p^a \cdot F_p \cdot \rho_{2p} \quad (4)$$

$$\frac{dI_s(z)}{dz} = -\alpha_s \cdot I_s(z) - I_s(z) \cdot (1 - N_2) \cdot \sigma_s^a \cdot \Gamma_s \cdot \rho_{Er} + I_s(z) \cdot N_2 \cdot \sigma_s^e \cdot \Gamma_s \cdot \rho_{Er} \quad (5)$$

où ρ_{Er} : est la concentration des ions Erbium dans la fibre ; $\alpha_{s,p}$: est le coefficient de perte de la fibre a la longueur d'onde du signal et pompe respectivement ; $\Gamma_{s,p}$: est le facteur de recouvrement entre les ions excités et le signal et pompe respectivement.

Maintenant que l'évolution de l'intensité du signale a travers la fibre est obtenue, le gain de l'amplificateur est donné par :

$$G = \ln \frac{I(z)}{I(z=0)} \quad (6)$$

2.3. Le bruit

Tout amplificateur optique où électronique à un bruit de fond, dans le cas de l'EDFA le bruit est originaire de l'émission spontanée, car tous les électrons excités peuvent se relaxer spontanément de l'un des états supérieurs à l'état fondamental en émettant un photon qui est totalement défient des photons du signal. Ce photon spontané peut à lui même être amplifier à travers la fibre on stimulant les électrons (ions) excités pour émettre des photons identique a celui-ci. Ce signal parasite, appelé ASE (Amplified Spontaneous Emission), peut se produire à n'importe quelle fréquence. Il réduit évidemment le gain de l'amplificateur on volant les photons qui participent à l'émission stimulée avec les photons du signal [3].

L'évolution de l'ASE le long de la fibre est décrite par :

$$\frac{dI_{ASE}(z)}{dz} = -\alpha_s \cdot I_{ASE}(z) - I_{ASE}(z) \cdot (1 - N_2) \cdot \sigma_{ASE}^a \cdot \rho_{Er} + I_{ASE}(z) \cdot N_2 \cdot \sigma_{ASE}^e \cdot \rho_{Er} - I_{ASE}^0 \cdot \rho_{Er} \cdot N_2 \cdot \sigma_{ASE}^e \quad (7)$$

avec : $I_{ASE}^0 = \frac{F}{\pi r^2} \frac{2hc}{\lambda_{ASE}} \Delta\nu$

où r : représente le rayon du cœur de la fibre, c : la vitesse de la lumière, $\Delta\nu$: la bande de fréquence de l'ASE (Hz).

En effet, l'ASE est générée sur plusieurs terahertz et pour des raisons de modélisation, celui-ci est discrétisé en plusieurs composantes spectrales de largeur $\Delta\nu$ qui est au choix de l'utilisateur [3].

3. Simulation et résultats

Dans notre étude, nous avons résolu les équations (4,5,6,7) à l'aide d'un programme écrit dans un environnement Matlab, le gain a été simulé en fonction de quatre paramètres fondamentaux pour deux longueurs d'onde de pompage (980-1480nm) : la longueur de la fibre (L), le rayon de la fibre (r), la densité de l'Erbium (ρ_{Er}) et la puissance de pompage (Pp). Les paramètres types pour une amplification optimale obtenue par notre simulation sont donnés dans le tableau 1.

3.1. Le gain $f(L, Pp)$

On fixe les valeurs de la densité de l'Erbium et le rayon du cœur de la fibre et on varie L de 10 à 60 m. Les résultats son montrés dans les figures 2 et 3.

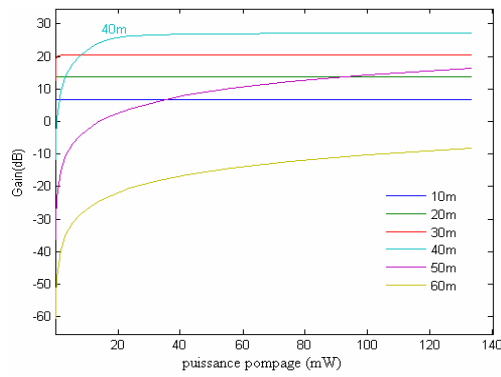


Figure.2 : variation du gain en fonction de la puissance de pompage pour L=10 à 60 m, pour un pompage à 980nm

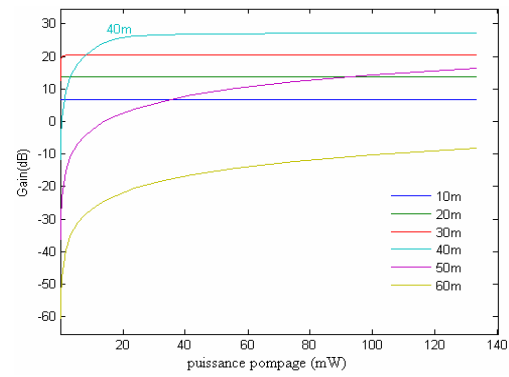


Figure 3 : variation du gain en fonction de la puissance de pompage pour L=10 à 60 m, pour un pompage à 1480nm

Les courbes des figures 2 et 3 montrent que le gain a une variation rapide pour un pompage moins de 20 mW et lente au de là. On retient de ses figures que pour un pompage à 980 nm on a un gain maximum pour $L = 40$ m, tandis qu'à 1480 nm on a un gain maximum à $L = 50$ m, se qu'on remarque aussi c'est qu'on pompe à 1480 nm on obtient un gain de +29 dB qui est plus grand qu'à 980 nm (+27 dB), chose qui est logique, car, En pompant à 1480 nm, on comprend bien que le rendement sera meilleur à cause de l'écart entre l'énergie du photon pompe et celle du photon signal, qui est plus faible que lorsque l'on pompe à 980 nm. En effet, lorsque l'on pompe à 980nm, chaque fois qu'un photon pompe est absorbé, on absorbe une énergie de 1.26 eV. Puis on a une transition vers le niveau à 1550 nm, soit 0.81 eV, ce qui représente une perte d'énergie de 0.45 eV. Autrement dit, le simple écart de longueur d'onde fait que le rendement du système est limité au maximum à :

$$\frac{0.81}{1.26} \approx 65\%$$

À 1480nm, ce rapport est plus proche de 100%. En effet, 1480nm correspond à 0.839 eV , d'où une limite de :

$$\frac{0.81}{0.839} \approx 97\%$$

3.2. Le gain $f(r, P_p)$

Maintenant on fixe $L=50$ m pour un pompage à 980nm, $L=40$ m pour 1480nm et on fixe la densité de l'Erbium on variant le rayon du cœur de 1 à 4 μm . Les résultats son montrés dans les figures 4 et5.

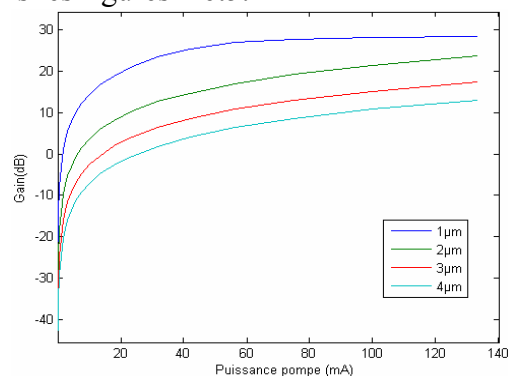


Figure.4 : variation du gain en fonction de la puissance de pompage pour $r=1$ à 4 μm , pour un pompage à 980nm

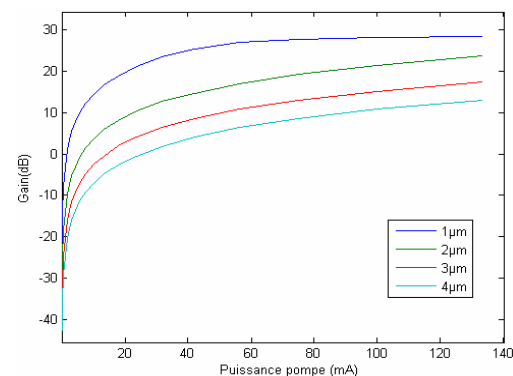


Figure.5 : variation du gain en fonction de la puissance de pompage pour $r=1$ à 4 μm , pour un pompage à 1480nm

Les figures 4 et 5 montrent que pour les deux pompages on a un gain maximum pour un rayon de $1\mu\text{m}$. Chose qui est logique, car, l'intensité du signal se comporte inversement au rayon du cœur, en pratique se rayon ($1\mu\text{m}$) n'a pas d'application autour de la longueur d'onde d'émission utilisée (1550 nm), alors le rayon qu'on choisira sera $2\mu\text{m}$.

3.3. Le gain $f(\rho_{\text{Er}}, P_p)$

Maintenant on fixe $r = 1\mu\text{m}$, $L=60\text{m}$ pour 980nm et $L=50\text{m}$ pour 1480nm . Et on varie la densité de l'Erbium. Les résultats sont montrés dans les figures 6 et 7.

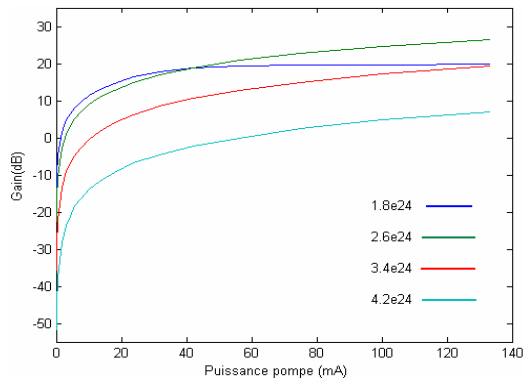


Figure.6 : variation du gain en fonction de la puissance de pompage pour $\rho_{\text{Er}} = 1.8.10^{24}$ à $4.2. 10^{24}\text{m}^2$ avec un pas de 0.8m^2 , pour un pompage à 980nm

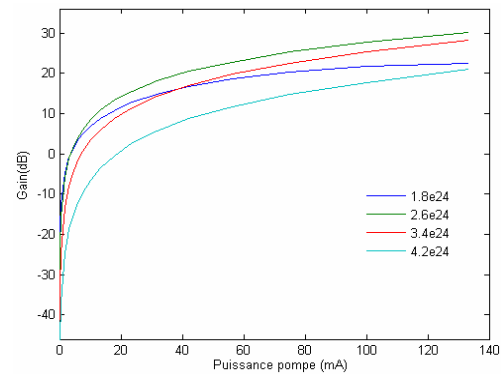


Figure.7 : variation du gain en fonction de la puissance de pompage pour $\rho_{\text{Er}} = 1.8.10^{24}$ à $4.2. 10^{24}\text{m}^2$ avec un pas de 0.8m^2 , pour un pompage à 1480nm

Les figures 6 et 7 montrent que pour les deux pompages on a un gain maximum pour une densité d'Erbium $= 2.6.10^{24}\text{ m}^2$. Pour 980 nm on a un gain de $+ 27\text{ dB}$ et pour 1480 nm on a $+ 29\text{ dB}$ pour cette densité se qui nous portes la choisir comme paramètre optimal de notre simulation.

3.4. Le bruit (ASE)

La figure.8 montre que pour un pompage à 1480 nm on a un bruit de -100dBm/Hz et pour la longueur d'onde 980 nm le bruit est autour de -115dBm/Hz .

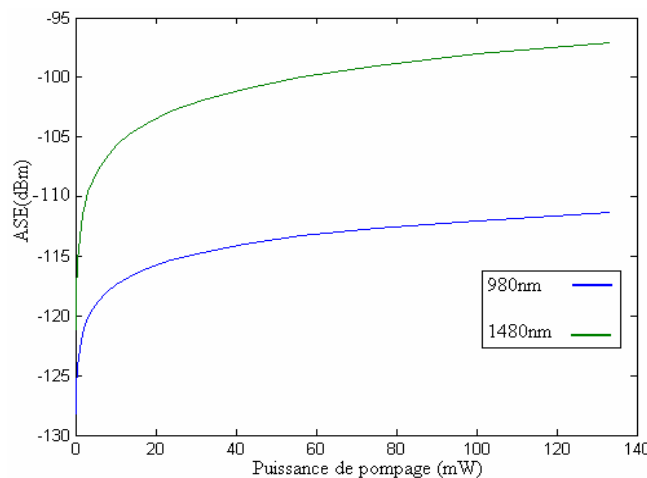


Figure.8 : variation du bruit en fonction de la puissance de pompage à deux longueurs d'onde 980nm et 1480nm

Cette figure montre qu'on a grand bruit (ASE) pour le pompage à 1480 nm que celui à 980 nm, chose qui est logique, car, comme on l'a vu précédemment, qu'on on pompe à 1480 nm les atomes (ions) s'excite directement vers le deuxième niveau ($^4I_{13/2}$), cependant cela entraîne l'encombrement du niveau, on a alors plus de possibilité de désexcitation où d'émission spontanée. A l'inverse, le pompage à 980 nm présente un faible bruit, cela est dû à la présence du troisième niveau ($^4I_{15/2}$), ce dernier permet au niveau métastable ($^4I_{13/2}$) d'avoir un temps de relaxation.

4. Conclusion

En conclusion de cette étude basée sur la simulation numérique, nous avons mis en évidence l'apport de chaque paramètre sur le gain de l'amplificateur à fibre optique dopée par des ions Erbium. Le tableau 1 résume les paramètres obtenus par notre simulation numérique et qui nous permettent une amplification optimale pour deux différentes longueurs d'onde de pompage. Ces paramètres ont été validés par la littérature, et on peut affirmer que le programme de simulation utilisé peut en effet prédire l'évolution du gain de l'amplificateur à fibre dopée Erbium, qui est le but de cette étude.

Tableau 1 : les résultats obtenus par simulation

	980 nm	1480 nm
L	40 m	50 m
r	1 μ m	1 μ m
ρ_{Er}	$2.6 \times 10^{24} m^{-2}$	$2.6 \times 10^{24} m^{-2}$
Pp	60 mW	60 mW
Gain	+27.16 dB	+28.14 dB
ASE	-115 dBm	-100 dBm

Référence

- [1] G. P. Agrawal, Fiber Optic Communication Systems, John Wiley & Sons, New York, 1997.
- [2] Giles C.R., Desurvire E., "Modelling Erbium-Doped Fiber Amplifiers", Journal of Lightwave Technology Letters, Vol. 9, No 2, 271-283, 1991.
- [3] P.C. Becker, N.A. Olsson, J.R. Simpson, "Erbium-Doped Fiber Amplifiers: Fundamentals and Technology.