

## Compensation de la dispersion dans la propagation dans les fibres optiques

Faouzi SALAH-BELKHODJA<sup>1</sup>, Rafah NAOUM<sup>2</sup>, Khaled KHELIL<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Université Djillali Liabes de Sidi Bel Abbès, BP 89 22000 Sidi Bel Abbès, ALGERIE.

<sup>2</sup>Telecommunications and Digital Signal Processing Laboratory, Djillali Liabes University of Sidi Bel-Abbes, Algeria

### Résumé

*L'utilisation des fibres optiques comme moyen de transport de l'information se généralise de plus en plus. Ces fibres sont utilisées pour la transmission de signaux multimédias ; ces derniers occupent de grandes bandes fréquentielles et la multiplication des canaux, rendue possible grâce au multiplexage en longueur d'ondes, exige une bande passante du moyen de transport assez large ce qui est le cas pour la fibre optique. Une autre caractéristique importante de la fibre optique c'est son facteur d'atténuation très faible qui avoisine les 0,2 dB/km. Le problème qu'on peut soulever dans la transmission sur de grandes distances, à partir de quelques km, c'est la dispersion du signal qui est principalement d'origine chromatique. Actuellement, la mise au point de nouvelles fibres compensatrices de dispersion permet d'améliorer nettement la transmission. L'existence de millions de km de fibres déjà installés rend leur remplacement immédiat irréalisable. Une solution intermédiaire est de remplacer uniquement des tronçons de fibres pour compenser en partie la dispersion.*

**Mots clefs :** *fibre optique/dispersion/non linéarité/méthode à pas fractionnaires/équation non-linéaire de Schrödinger*

### Abstract

Optical fibers are becoming more and more common for carrying information. These fibers, characterized by a very large bandwidth, are best suited for the transmission of multimedia signals which occupy large frequency bands. Besides, combining such signals on a single channel, using wavelength multiplexing, requires a large amount of bandwidth. Hence, optical fibers are highly appreciated. Another important feature of optical fiber is its very low attenuation coefficient of approximately 0.2 dB / km. In general, the problem that may arise when communicating over long distances is the dispersion phenomenon which is namely of chromatic type. Currently, the development of new dispersion compensating fibers can considerably improve the transmission quality. However, the existence of millions of miles of fiber already installed makes their immediate replacement unfeasible. An alternative solution is to substitute only segments of fiber to partially compensate the dispersion.

**Keywords:** *optical fiber / dispersion / non linearity / method of fractional steps / nonlinear Schrödinger equation*

## 1. Introduction

L'étude de la compensation de la dispersion nécessite la simulation de la propagation de la lumière dans une fibre optique et des méthodes assez simples ont été utilisées. Nous citons la méthode de la BPM (Beam propagation Method) basée dans sa première version sur la transformée de Fourier directe ensuite élargie aux différences finies et aux éléments finis. Cette méthode ne tient pas compte des effets de la dispersion et de la non linéarité dans la fibre optique. La méthode que nous allons utiliser s'intitule la méthode à pas fractionnaires [1,2,7]. Elle tient compte des effets cités précédemment mais d'une façon alternée sur un même pas de calcul. Le travail proposé mettra en évidence le principe de cette méthode. Cette méthode va nous permettre, par la simulation de la propagation, de montrer la compensation de la dispersion chromatique en choisissant la fibre (monomode) et le tronçon adéquat présentant ces propriétés.

## 2. Mise en équation

L'équation non-linéaire de Schrödinger décrit la propagation dans une fibre optique en tenant compte à la fois des phénomènes linéaires et non linéaires se produisant dans la fibre optique. L'équation non-linéaire de Schrödinger généralisée [6,7] est donnée comme suit :

$$i \frac{\partial A}{\partial z} + \frac{i}{2} \alpha A - \frac{1}{2} \beta_2 \frac{\partial^2 A}{\partial T^2} - \frac{i}{6} \beta_3 \frac{\partial^3 A}{\partial T^3} + \gamma \left[ |A|^2 A + \frac{i}{\omega_0} \frac{\partial}{\partial T} (|A|^2 A) - T_R A \frac{\partial |A|^2}{\partial T} \right] = 0 \quad (1)$$

Avec  $A = A(z,t)$  : amplitude du champ suivant la coordonnée  $z$

$\alpha$  : facteur d'atténuation

$\beta_2$  : terme de dispersion d'ordre 2

$\beta_3$  : terme de dispersion d'ordre 3

$\gamma$  : coefficient de non linéarité

Les effets non linéaires mis entre crochets dans l'équation (1) mettent en évidence respectivement l'effet Kerr, l'effet Raman et l'effet Brillouin ; ces deux derniers effets sont importants pour des signaux de très courte durée et de puissance élevée. Pour les signaux de courte durée, on aboutit à une équation de Schrödinger normalisée :

$$i \frac{\partial A}{\partial z} + \frac{i}{2} \alpha A - \frac{1}{2} \beta_2 \frac{\partial^2 A}{\partial T^2} + \gamma |A|^2 = 0 \quad (2)$$

Pour l'utilisation de la méthode à pas fractionnaires, récrivons l'équation de Schrödinger normalisée en mettant en évidence les deux effets de dispersion et de non-linéarité comme suit :

$$\frac{\partial A(z, t)}{\partial z} = (\hat{D} + \hat{N})A(z, t) \quad (3)$$

Avec

$$\hat{D} = -\frac{i}{2}\beta_2 \frac{\partial^2}{\partial T^2} - \frac{\alpha}{2} :$$

l'opérateur de dispersion

$$\hat{N} = i\gamma|A|^2 : \text{ l'opérateur de non linéarité}$$

La solution exacte de l'équation (3) est :

$$A(z + dz, t) = \exp[dz(\hat{D} + \hat{N})]A(z, t) \quad (4)$$

Cette équation sera à la base de la méthode à pas fractionnaires qui va être utilisée.

### 3. Descriptif de la méthode à pas fractionnaires

Il est supposé dans la méthode citée que les deux effets de dispersion et de non-linéarité agissent séparément. Le principe de la méthode consiste à tenir compte des deux effets sur le même pas de calcul  $dz$  ( $z$  : direction de propagation) mais d'une façon alternée en appliquant l'opérateur non linéaire au milieu du pas de discrétisation. Le calcul est itératif et se fait sur toute la longueur de la fibre en prenant pour chaque nouveau pas de calcul comme répartition initiale du champ celle obtenue à la fin du pas précédent. Cette méthode est basée sur la transformée de Fourier. Ce programme est écrit sous matlab.

### 4. Simulation

L'idée proposée dans ce travail est tout simplement d'utiliser deux tronçons de fibres optiques soudées entre elles où le terme de dispersion d'ordre 2  $\beta_2$  du premier tronçon doit être de signe opposé à celui du deuxième tronçon. Pour compléter l'étude, il sera introduit les effets de non linéarité ( $\gamma$ ) et d'atténuation ( $\alpha$ ).

Les cas qu'on va traiter concernent une fibre optique de longueur  $l=5$  km sur laquelle il va être simulé une propagation d'une gaussienne d'expression (en  $z=0$ ) :

$$A(0, T) = \exp\left(-\frac{T^2}{2T_0^2}\right) \quad (5)$$

Avec  $T_0$  : largeur au point d'intensité  $1/e$

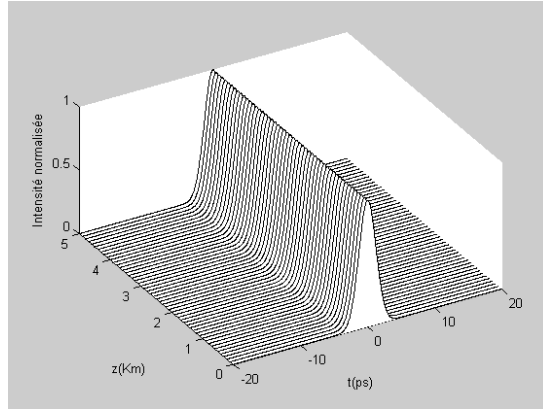


Figure 1 : Simulation de la propagation avec  $l=5$  km -  $\beta_2=0$  -  $\alpha=0$  -  $\gamma=0$  -  $T_0= 1.8$  ps

C'est le cas idéal où la fibre n'est ni dispersive, ni non linéaire et dont le coefficient d'atténuation est nulle. On remarque que la répartition du champ reste identique tout le long de la fibre

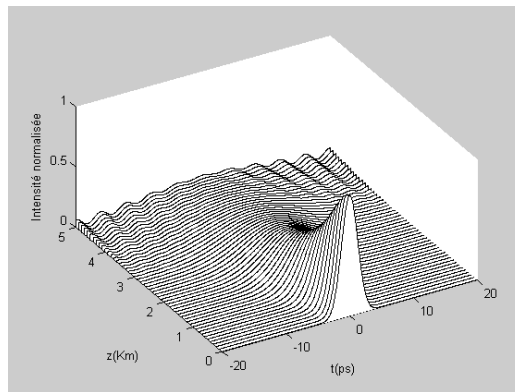


Figure 2 : Simulation de la propagation avec  $l=5$  km -  $\beta_2=10$  ps<sup>2</sup>/km -  $\alpha=0$  -  $\gamma=0$  -  $T_0= 1.8$  ps

A la différence du premier cas d'étude, il a été tenu compte de l'effet dispersif de la fibre.

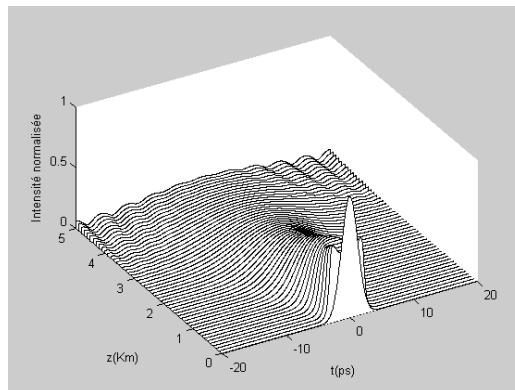


Figure 3 : Simulation de la propagation avec  $l=5$  km -  $\beta_2=10$  ps<sup>2</sup>/km -  $\alpha=0$  -  $\gamma=3.2$  W<sup>-1</sup>km<sup>-1</sup> -  $T_0= 1.8$  ps

Dans ce cas là, il a été combiné à la fois les effets dispersif et non linéaire.

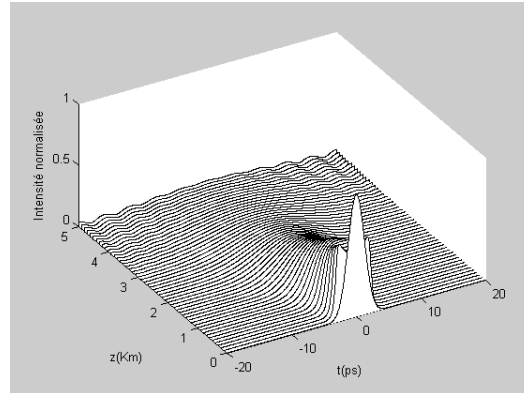


Figure 4 : Simulation de la propagation avec  $l=5$  km -  $\beta_2=10$  ps<sup>2</sup>/km -  $\alpha=0.2$  dB/km -  $\gamma=3.2$  W<sup>-1</sup>km<sup>-1</sup> -  $T_0= 1.8$  ps

Sur le cas d'étude précédent, il a été rajouté l'effet de l'atténuation ; on remarque un léger affaiblissement mais les formes restent les mêmes.

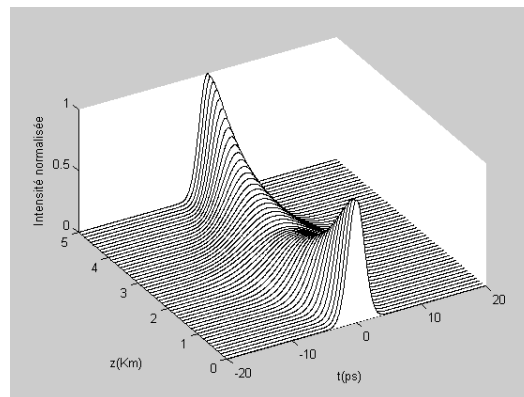


Figure 5 : Simulation de la propagation avec  $l=5$  km ( $l_1=2.5$  km ;  $l_2=2.5$  km) -  $\beta_2=10$  ps<sup>2</sup>/km -  $\beta_{2p}=-10$  ps<sup>2</sup>/km -  $\alpha=0$  -  $\gamma=0$  -  $T_0= 1.8$  ps

Dans ce cas là, la deuxième moitié de la fibre ( $l_2$ ) a été remplacée par une fibre compensatrice dont l'effet dispersif provoqué est de signe opposé mais de même module ( $\beta_{2p} = -\beta_2$ ) ; on remarque qu'à la sortie de la longueur totale de la fibre (5 km) la répartition initiale du champ en forme et en amplitude a été reconstituée.

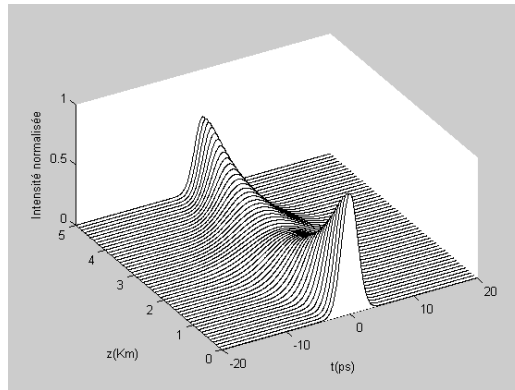


Figure 6 : Simulation de la propagation avec  $l=5$  km ( $l_1=2.5$  km ;  $l_2=2.5$  km) -  $\beta_2=10$  ps<sup>2</sup>/km -  $\beta_{2p}=-10$  ps<sup>2</sup>/km -  $\alpha=0.2$  dB/km -  $\gamma=0$  -  $T_0= 1.8$  ps

Par rapport au cas précédent, il a été tenu compte de l'atténuation du signal dans la fibre. La forme de la répartition du champ a été reconstituée mais l'amplitude a été atténuée.

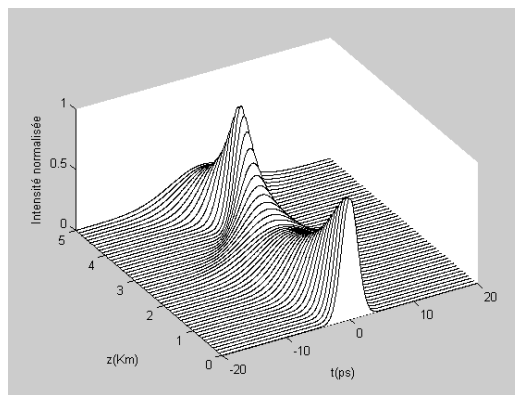


Figure 7 : Simulation de la propagation avec  $l=5$  km ( $l_1=2.5$  km ;  $l_2=2.5$  km) -  $\beta_2=10$  ps<sup>2</sup>/km -  $\beta_{2p}=-20$  ps<sup>2</sup>/km -  $\alpha=0$  -  $\gamma=0$  -  $T_0= 1.8$  ps

L'augmentation du coefficient de dispersion en module ( $|\beta_{2p}|=2\beta_2$ ) de la fibre compensatrice a permis de retrouver la forme initiale au bout d'à peu près 3.7 km de la longueur totale de la fibre soit 1.2 km de la fibre compensatrice.

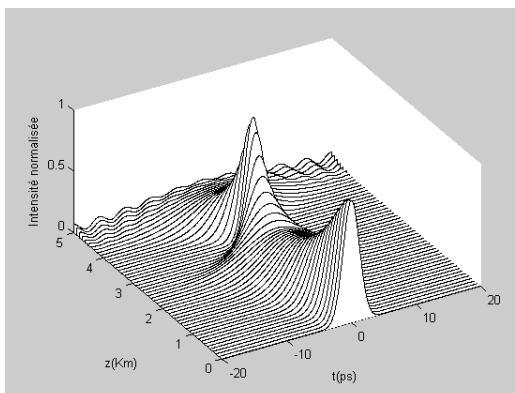


Figure 8 : Simulation de la propagation avec  $l=5$  km ( $l_1=2.5$  km ;  $l_2=2.5$  km) -  $\beta_2=10$  ps<sup>2</sup>/km -  $\beta_{2p}=-30$  ps<sup>2</sup>/km -  $\alpha=0$  -  $\gamma=0$  -  $T_0= 1.8$  ps

Même cas d'étude que précédemment mais cette fois le module du coefficient de dispersion a été triplée ( $|\beta_{2p}|=3\beta_2$ ) ; la forme initiale du champ a été retrouvée au bout d'à peu près 3.3 km de la longueur totale de la fibre soit 0.8 km de la fibre compensatrice.

## 5. Conclusion

Ce travail a pu mettre en évidence qu'une solution partielle afin d'éliminer en partie la dispersion est possible sans avoir à remplacer toutes les fibres optiques installées. L'avancée de la technologie dans la fabrication des fibres optiques compensatrices de dispersion [3,4] permettra de réduire en longueur les tronçons de fibres compensatrices à insérer ; les résultats théoriques obtenus le prouvent. En comparant les résultats des figures 7 et 8, on constate que la réduction de la longueur du tronçon de fibre compensatrice sera d'autant plus importante que l'effet de compensation sera important c'est-à-dire  $\beta_{2p}$  de plus en plus grand en module.

## Bibliographie

- [1] T.T.Meirelles, A.A.Rieznik, and H.L.Fraguito, "Study on a New Split-Step Fourier Algorithm for Optical Fiber Transmission Systems Simulations", IMOC'2005, Brasilia, Brazil (2005).
- [2] Mohamed Hakim Agnila Apithy, "Contribution à l'étude de la propagation dans les composants passifs à fibres optiques", thèse de maîtrise ès sciences appliquées en génie électrique, faculté d'ingénierie, université de Moncton, Canada, Août 2004
- [3] F. Gérôme, J.-L. Auguste, and J.-M. Blondy. "Design of dispersion-compensating fibers based on a dual-concentric-core photonic crystal fiber", *Optics Letters*, Vol: 29, Issue: 23, pp. 2725-2727, December 2004
- [4] B. Zsigri, J. Laegsgaard, and A. Bjarklev. "A novel photonic crystal fibre design for dispersion compensation". *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, Vol: 6, Issue: 7, pp. 717-720, 2004
- [5] H. Apithy, Y. Bouslimani and H. Hamam "Split-step algorithm based propagation of dark soliton-like pulses" *International Journal of Modelling and Simulation*, vol: 27, 2007
- [6] G.M. Muslu, H.A. Erbay "Higher-order split-step Fourier schemes for the generalized nonlinear Schrödinger equation", *Mathematics and Computers in Simulation*, Vol: 67, Issue 6, pp. 581-595, January 2005
- [7] Scott Zoldi, Victor Ruban, Alexandre Zenchuk, and Sergey Burtsev, "Parallel Implementation of the Split-step Fourier Method For Solving Nonlinear Schrödinger Systems ", *Society for Industrial and Applied Mathematics*, Volume 32, Number 1, January 22,1999