

# Communications à fibres optiques : Limitations causées par la dispersion et les effets non-linéaires

## 1.0 Introduction

**L**a fibre optique occupe de plus en plus de place dans les systèmes de communications optiques. En plus de son rôle de guidage, elle est à la base de la réalisation de plusieurs composants optiques comme les filtres, les réseaux de Bragg, les amplificateurs à fibre dopée à l'erbium et les coupleurs [3, 9].

La lumière entre la fibre par un bout et sort de l'autre bout tel que rentré. C'est ce que nous croyons et aussi observons à première vue. Malheureusement mais aussi heureusement, la situation n'est pas aussi simple que nous croyons. En effet, il se passe entre les deux bouts de la fibre des phénomènes aussi divers que complexes. D'un côté, ces phénomènes compliquent énormément l'utilisation de la fibre mais d'un autre côté ils sont à l'origine de plusieurs applications intéressantes, telles que les réseaux de Bragg et leurs intérêts dans les télécommunications à haut débit. L'interprétation de ces phénomènes nécessite un arsenal mathématique très lourd. Nous invitons le lecteur dans cet article à découvrir la complexité de la chose sans pour autant se plonger dans les intégrales et les équations différentielles à plusieurs variables. La lumière se propage sous forme d'onde qui selon le milieu peut subir de l'absorption, réflexion, réfraction, diffraction, dispersion, non-linéarité, etc. Par exemple, c'est la réflexion de l'onde qui est à l'origine de l'intérêt des réseaux de Bragg (Figure 1). En effet, nous savons que la lumière blanche est composée de plusieurs composantes spectrales. Dans cette figure, nous voyons bien que quand la lumière traverse le milieu 2, une des composantes de cette dernière (disons la lumière rouge par exemple) est réfléchie vers l'entrée de la fibre. Ainsi de suite de sorte que chacune des composantes de la lumière est successivement réfléchie vers l'entrée et le réseau de Bragg sert alors de décomposition de la lumière. Ceci est particulièrement utile dans les systèmes DWDM où l'on doit réaliser des opérations de démultiplexage ou d'extraction de longueur d'onde.

L'étude de la propagation de la lumière dans les fibres optiques est donc d'une grande importance dans la conception, l'analyse et l'optimisation de la performance des systèmes de communications optiques. En effet, dans les systèmes où la modulation des signaux de données est faite directement à partir de l'intensité de la source lumineuse (ceci sera expliqué en utilisant des illustrations à la prochaine section), l'indice de réfraction du cœur de la fibre dépend de la longueur d'onde de la lumière qui la traverse de sorte que les diverses composantes d'un groupe de signaux (représentant en fait un ensemble de bits) vont 'voyager' à des vitesses différentes dans la fibre, créant ainsi un étalement temporel et un chevauchement de l'information, rendant le décodage de bits à l'arrivée inintelligible: c'est l'effet de dispersion chromatique ou dispersion en groupe de vitesse. Ce dernier limite alors la distance maximale à laquelle un signal peut être envoyé dans la fibre sans qu'il n'y ait de distorsion. À l'heure actuelle, c'est la dispersion de la fibre (et non l'atténuation) qui constitue le facteur limitant de la transmission de signaux à haut débit sur de longues distances. La section III sera consacrée à l'explication de cet aspect.

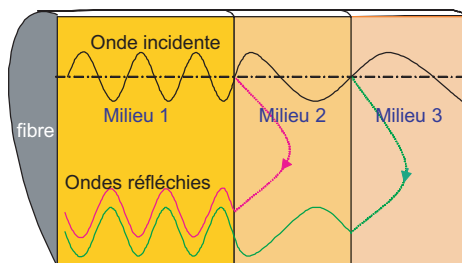


Figure 1: Ondes réfléchies dans un réseau de Bragg. Les ondes réfléchies peuvent interférer constructivement (cas de la figure) ou destructivement.

par H. Apithy, Y. Bouslimani et H. Hamam,

Faculté d'ingénierie, Université de Moncton, NB

### Abstract

Several phenomena occur during propagation of a signal in a fiber optic. We analyze here the effects of dispersion and nonlinear effects in a fiber optic system. We show how these effects affect the performance of optical communication systems. We do show in particular that under certain conditions, the dispersive and nonlinear effects are compensated between them and the signal is propagated then without distortion in the fibre. One speaks then about solitonic propagation.

### Sommaire

Plusieurs phénomènes ont lieu lorsqu'un signal se propage dans une fibre optique : absorption, réflexion, etc. Nous analysons ici les effets des phénomènes de dispersion et de non-linéarité dans une fibre optique. Nous démontrons comment ces effets affectent la performance des systèmes de communications optiques. Nous montrons notamment que sous certaines conditions, les effets dispersifs et non-linéaires se compensent entre eux et le signal se propage alors sans distorsion dans la fibre. On parle alors de propagation solitonique.

Dans le présent document, on se propose de faire un travail de vulgarisation sur les phénomènes de dispersion dans la fibre optique monomode et de présenter les diverses solutions utilisées de nos jours pour résoudre ce problème.

## 2.0 Modulation Optique

Depuis les travaux de Fresnel, nous savons que la lumière possède une nature ondulatoire. Avant d'envoyer le signal dans la fibre, on le module avec une autre onde dite porteuse. La modulation optique est jusqu'à présent une modulation d'amplitude.

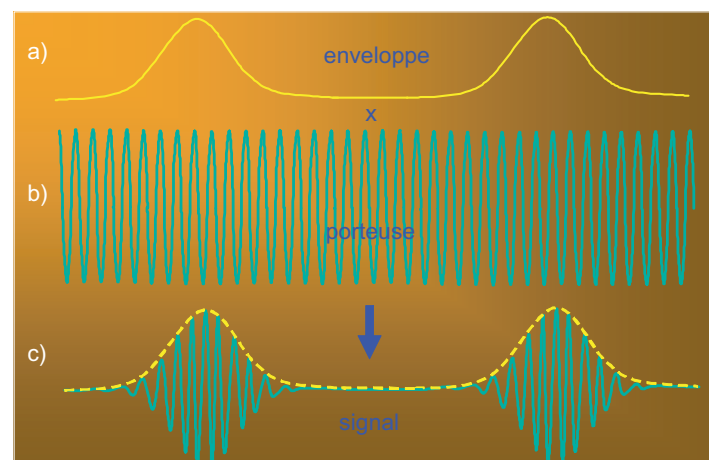


Figure 2: Modulation optique.

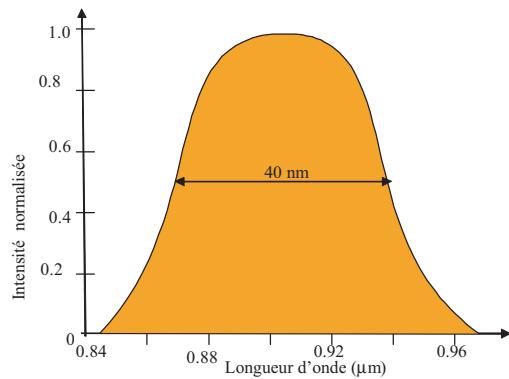


Figure 3: Spectre typique d'une LED.

La modulation optique consiste à multiplier le champ sinusoïdal (une seule harmonique - Figure 2b) par des impulsions (enveloppe - Figure 2a), pour obtenir le signal optique modulé (Figure 2c). Cette multiplication (modulation d'amplitude) crée des harmoniques de faibles mais aussi des hautes fréquences.

Les fréquences ne voyagent pas à la même vitesse: d'où le phénomène de dispersion dont nous allons plus en détail parler dans le paragraphe suivant.

Pour donc contourner ce phénomène de dispersion, il existe notamment deux solutions:

1. Choisir des formes d'impulsion particulières (des enveloppes particulières) qui se propageraient sans distorsion: les solitons,
2. Ne pas envoyer le signal sous une seule harmonique dans la fibre mais plutôt prévoir plusieurs harmoniques dans la même impulsion (avant propagation) avec des harmoniques de faibles fréquences qui doivent être initialement en avance dans le temps (Figure 5b) et des harmoniques de hautes fréquences qui sont initialement en retard dans le temps: c'est-à-dire des impulsions à pas décroissants.

En pratique pour réaliser ce genre d'impulsions, on fait traverser l'impulsion classique dans un milieu ayant un profil d'indice sous forme d'une structure longitudinale à pas variable (Figure 6).

### 3.0 Origine De La Dispersion Chromatique Ou Dispersion En Groupe De Vitesse Dans La Fibre Optique

Un milieu est dit dispersif lorsque l'indice de réfraction de ce milieu dépend de la fréquence (autrement dit de la longueur d'onde) de l'onde qui le traverse. Or, les sources de lasers utilisées dans le cadre de la communication WDM ne sont pas strictement monochromatiques; elles ont une largeur de spectre centrée autour d'une longueur centrale  $\lambda_0$  (Fig-

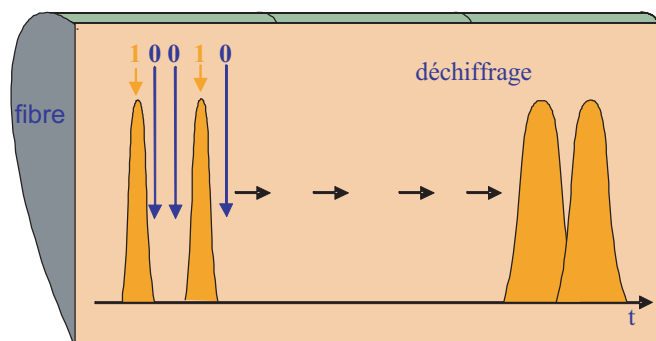


Figure 4: Élargissement temporel d'une impulsion dans une fibre dispersive.

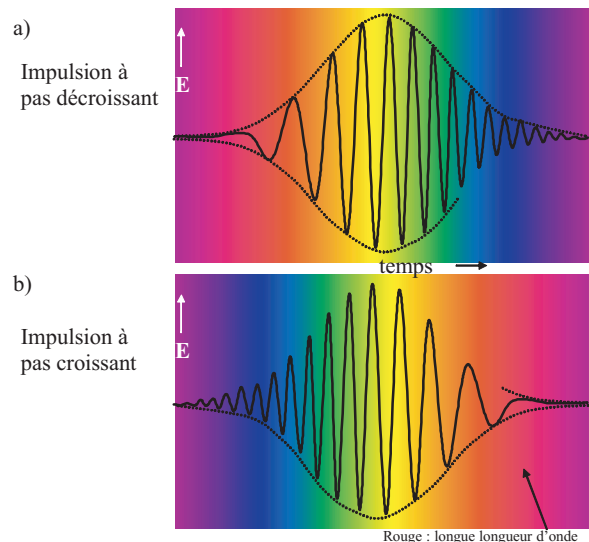


Figure 5: Impulsions à pas variables: a) pas décroissants; b) pas croissants.

ure 3) qui fait qu'une impulsion s'élargit lorsqu'elle se propage dans un milieu dispersif.

En effet, lorsqu'une onde se propage dans un milieu dispersif, les diverses composantes fréquentielles de l'onde se propagent à des vitesses différentes, créant un étalement temporel de l'onde à l'arrivée. On parle alors de dispersion en groupe de vitesse ou "Group Velocity Dispersion" (GVD) (Figure 4).

L'étalement temporel entre deux longueurs d'ondes est proportionnel à la distance de transmission, à la largeur spectrale de la source et au paramètre de dispersion du milieu. Plus la distance de transmission est élevée et la largeur spectrale de la source grande, plus l'impulsion s'élargit à l'arrivée.

Le paramètre de dispersion d'un milieu est proportionnel à la longueur d'onde et à l'accélération du changement de l'indice de réfraction lorsque la longueur d'onde varie dans ce milieu. S'il est négatif, le milieu est dit posséder une dispersion normale ou positive. Si un signal est transmis dans un milieu de dispersion normale, les composantes de hautes fréquences "voyagent" plus lentement que les composantes de basses fréquences et le signal devient "chirpé positivement" (Figure 5a) augmentant en fréquences avec le temps. Dans le cas contraire (Figure 5b) où le paramètre de dispersion est positif, le milieu possède une dispersion anormale et le signal devient "négativement chirpé" (i.e diminue de fréquences avec le temps). Si, enfin, ce paramètre est nul, le milieu est non-dispersif et toutes les composantes fréquentielles du signal voyagent à une même vitesse à travers ce milieu.

À un niveau microscopique, le retardement de la lumière, quand elle passe à travers un matériau peut être perçu comme un processus con-

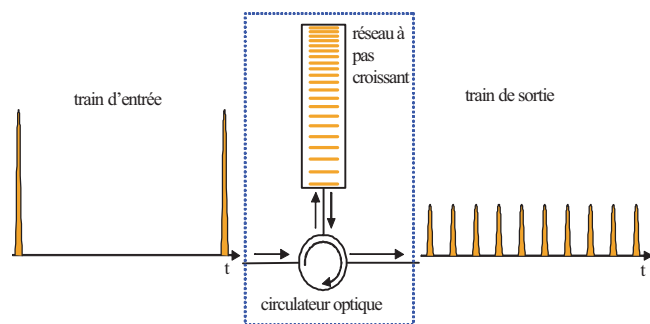
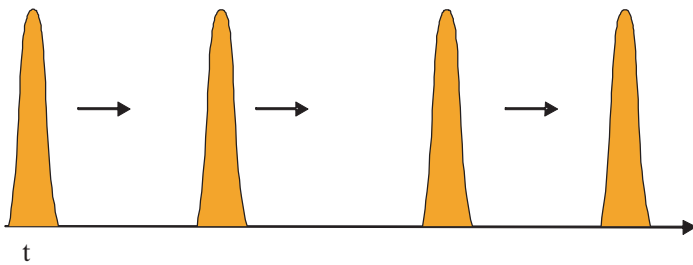


Figure 6: Réseau à pas linéairement variables utilisé pour augmenter la fréquence des impulsions en profitant de l'effet Talbot temporel.



**Figure 7: Propagation d'un soliton fondamental dans un milieu dispersif non-linéaire: le signal se propage sans distorsion sur toute la fibre.**

tinu d'absorption et d'émission de photons par les atomes du matériau quand les deux types de particules sont en contact. Entre deux atomes voisins de matériau, le photon "voyage" à la célérité  $c$ , exactement comme dans le vide. Mais, quand les photons cognent les atomes, ils sont absorbés par ces derniers et aussitôt ré-émis, créant ainsi un délai au niveau de chaque atome, ce qui résulte à une réduction de la vitesse des photons; la vitesse d'absorption et de ré-émission du photon dépend évidemment de la longueur d'onde du photon incident (milieu dispersif).

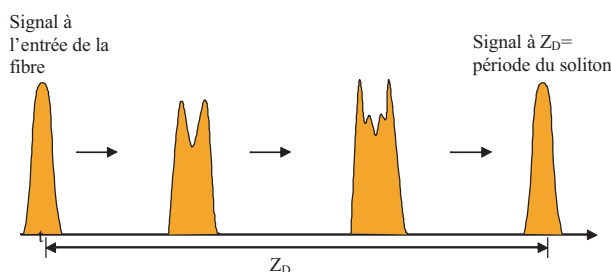
Il existe d'autres types de dispersion dans la fibre, notamment la dispersion chromatique d'ordre élevé, la dispersion en mode polaire dont l'étude dépasse le cadre de cet article [3].

#### 4.0 Propagation D'un Signal Dans Un Milieu Dispersif Non-Linéaire: Existence Possible Des Solitons

La puissance optique couplée dans les fibres monomodes se trouve confinée sur de très faibles surfaces du fait de la petite dimension de leur zone guidante (de 3 à 10 mm de diamètre suivant la longueur d'onde de coupure). Une intensité de l'ordre du MW/cm<sup>2</sup> est facilement obtenue en injectant 100 mW dans la fibre. Les champs électromagnétiques intenses qui en résultent sont susceptibles de modifier les propriétés de la silice, support de propagation, par exemple en déformant les nuages électroniques. Sous l'action du champ lumineux intense, l'indice de réfraction accuse une variation: C'est l'effet de Kerr optique. Un tel milieu est dit alors non-linéaire.

Lorsqu'un signal se propage dans un milieu non-linéaire, l'effet de Kerr induit deux phénomènes importants à savoir l'auto-modulation en phase (SPM: Self-Phase Modulation) et la modulation croisée de phase (XPM: Cross-Phase Modulation). Pour les autres phénomènes non-linéaires qui pourraient y avoir dans la fibre optique, à savoir la diffusion Raman, l'effet Brillouin ou l'oscillation paramétrique, nous invitons le lecteur à consulter la référence [3].

Comme on l'a dit plus haut, les sources de lasers utilisées dans le cadre de la communication WDM ne sont pas strictement monochromatiques; elles ont une largeur de spectre. La co-propagation de ces champs à diverses longueurs d'ondes induit un déphasage non-linéaire du champ



**Figure 8: Propagation d'un soliton d'ordre supérieur dans une fibre optique: le signal est récupéré à toutes les distances multiples de la période  $Z_D$ .**

optique: c'est la modulation croisée de phase. La XPM est toujours accompagnée de la SPM et est due à la dépendance de l'indice de réfraction effectif d'une onde, non seulement de l'intensité de cette onde mais aussi de l'intensité des autres ondes en co-propagation. Ce déphasage augmente aussi avec la distance de transmission.

L'auto-modulation en phase, quant à elle, affecte une onde modulée en amplitude. Elle a pour effet d'introduire un déphasage non-linéaire dans le champ tout en gardant constant l'amplitude de ce dernier à travers la fibre. Il apparaît alors un retard de phase du sommet de l'impulsion par rapport à ses flancs car leurs vitesses de propagation sont différentes. Ce déphasage varie en fonction de l'intensité du champ et de la distance de propagation et implique un élargissement de fréquences au cours de la propagation dans la fibre. Ainsi, des fréquences inférieures à la fréquence initiale de l'impulsion sont générées sur le front montant de l'impulsion (aile Stokes), et des fréquences supérieures sur le front descendant (aile anti-Stokes).

Dans une fibre optique, les effets comme la dispersion en groupe de vitesse, l'auto-modulation de phase, de même que la modulation croisée de phase peuvent co-exister. Selon les paramètres du milieu et de l'onde qui s'y propage, nous avons quatre cas de figure:

- Aucun des effets dispersifs ou linéaires n'est significatif; la fibre joue alors un rôle passif dans ce cas de figure et le signal se propage sans distorsion (surtout si l'atténuation est entre temps compensée par des fibres dopées à l'erbium par exemple)
- La GVD est prédominante et les effets non-linéaires négligés. C'est le cas de la plupart des communications terrestres. Le seul défi à relever dans ce cas est alors la compensation de la dispersion (voir plus loin)
- Les effets non-linéaires comme la XPM et la SPM sont prédominants et la dispersion négligeable. C'est le cas des communications océaniques où l'intensité du signal est assez élevée pour induire l'effet de Kerr, responsable de la SPM et de la XPM.
- Les effets non-linéaires et la dispersion en groupe de vitesse co-existent dans la fibre et peuvent interagir entre eux.

Dans le cas où la GVD et la SPM (ou XPM) coexistent dans la fibre, la SPM accroît le taux d'élargissement pour un régime de dispersion normale et fait décroître ce taux pour un régime de dispersion anormale. Il y a élargissement du spectre des impulsions qui vont subir la dispersion chromatique. Dans la région de dispersion normale, on a sur le front montant une diminution de la fréquence donc du temps de propagation. Le front montant est avancé et le front descendant est retardé: il y a élargissement temporel de l'impulsion. Par contre, dans la région de dispersion anormale, l'élargissement spectral provoque un rétrécissement temporel. Lorsque qu'une impulsion se propage dans une fibre optique, la dispersion chromatique implique une différence de vitesse de groupe entre les différentes composantes spectrales de l'impulsion et par conséquent un élargissement temporel de celle-ci.

- En régime de dispersion anormale, les hautes fréquences sont plus rapides que les basses fréquences. En opposition, l'auto-modulation de phase induite par effet Kerr optique se traduit par la génération de basses (hautes) fréquences sur le devant (derrière) de l'impulsion. Ainsi, sous certaines conditions, un équilibre exact peut s'instaurer et l'effet Kerr maintient alors en phase les composantes fréquentielles qui se seraient étalées par dispersion. L'impulsion qui en résulte, appelée soliton brillant fondamental, se propage de façon invariante (Figure 7). Elle correspond à une famille de solutions analytiques stationnaires de l'équation de Schrödinger non linéaire, mise en évidence pour la première fois par Zakharov et Shabat en 1972 [4]. Prédit pour les fibres optiques une année plus tard [5], le soliton temporel fut démontré expérimentalement en 1980 [6]. Le soliton brillant fondamental possède un profil en sécante hyperbolique et une phase plane.
- En régime de dispersion normale, les hautes fréquences sont cette fois plus lentes que les basses. Pour compenser l'effet d'étalement linéaire de l'impulsion dans la fibre, il faut inverser le signe de la variation temporelle de la loi d'auto-modulation de phase. Ainsi, l'équilibre peut être satisfait pour un profil de forme tangente hyperbolique, correspondant à un fond continu intense illimité présentant un creux d'énergie en son centre. Cette impulsion particulière, appelée soliton noir, possède deux fronts de phase plans de part et d'autre du creux, séparés par un saut abrupt de  $\pi$ , plaçant les flancs du soliton noir en opposition de phase. La première observation expérimentale des solitons noirs a eu lieu en 1987 [7]. En 1995, une ligne de transmission à longue distance basée sur les solitons noirs a été démontrée [8].



- Dans certaines conditions, le signal qui se propage dans la fibre peut présenter les propriétés d'un soliton d'ordre élevé périodique, c'est-à-dire que nous avons une réplique du signal à des distances multiples d'une distance particulière alors appelé alors période du soliton (Figure 8).

## 5.0 Effets De La Dispersion Et Des Non-Linéarités Sur La Performance Des Systèmes Optiques

### 5.1 Effets de la dispersion

En règle générale, pour un débit de transmission donné, l'étalement temporel doit être plus petit que la période de pulsation (qui n'est rien d'autre que l'inverse du débit) pour minimiser le chevauchement des bits. Ce qui aboutit à une limitation du produit Distance de transmission x Débit de transmission par la largeur spectrale de la source et le paramètre de dispersion du milieu. Pour une largeur spectrale de source donnée dans un milieu de paramètre de dispersion donné, ce produit est constant et inversement proportionnel à la largeur spectrale et au paramètre de dispersion. À titre indicatif, si l'on utilise comme source un laser multi-mode à semi-conducteurs (de largeur spectrale 2 nm) et pour un débit de l'ordre de 2.5 Gb/s et pour une propagation autour de la longueur d'onde de 1550 nm (où la constante de propagation est de l'ordre de  $-20 \text{ ps}^2/\text{km}$ ), la distance maximale sur laquelle on peut transmettre les signaux sans qu'il n'y ait altération est de 330 km environ tandis que cette même distance devient seulement 20 km pour un débit de 10 Gb/s.

### 5.2 Effets de la XPM et de la SPM

Lorsque l'on module l'information en amplitude avant de l'envoyer dans le médium de transmission et que la démodulation est faite de façon incohérente comme dans le cas des systèmes de communications à détection directe par exemple, le déphasage non-linéaire introduit par la XPM et la SPM n'a pas de grande conséquence. Mais quand la démodulation est faite de façon cohérente, un tel déphasage devient un facteur limitant la performance du système, surtout dans les systèmes multicanaux. Il limite la puissance maximale du signal à transmettre sur la fibre.

## 6.0 Quelques Solutions Aux Problèmes De Dispersion Et De Non-Linéarités Dans Les Fibres Optiques

### 6.1 Fibres à dispersion décalée

Le problème de la dispersion pourrait être résolu en envoyant le signal à la longueur d'onde de 1.28 microns (dispersion presque nulle de l'ordre de  $\pm 4 \text{ ps.km}^{-1} \cdot \text{nm}^2$  à cette longueur d'onde pour une fibre standard monomode G652), mais l'atténuation est plus importante qu'à 1.55 microns (de l'ordre de  $\pm 17 \text{ ps.km}^{-1} \cdot \text{nm}^2$ ) et deviendrait le facteur limitatif. De plus, il n'existe pas d'amplificateurs dans cette bande, ce qui constitue un handicap important. Par ailleurs, le coefficient de dispersion chromatique est composé de deux parties: la dispersion du matériau (due à la variation de l'indice de réfraction avec la fréquence de la lumière) et la dispersion du guidage (due à la variation de la constante de propagation en fonction de la fréquence):  $D = D_m + D_g$ . Or  $D_g$  dépend de la géométrie de la fibre. Dans la pratique, il est donc possible d'ajuster ce type de dispersion pour compenser la dispersion du matériau et ainsi obtenir des fibres optiques à dispersion décalée dans lesquelles le zéro de dispersion (environ  $\pm 3 \text{ ps.km}^{-1} \cdot \text{nm}^2$ ) se trouve à une longueur d'onde de 1.55 microns. Cependant, les effets dispersifs d'ordres élevés persistent dans la fibre d'où on a recours aux fibres compensatrices de dispersion.

### 6.2 Réseaux à pas linéairement variables ou fibres à dispersion compensée

Une des solutions au problème de la dispersion est l'utilisation des réseaux de Bragg à pas linéairement variables ou fibres à dispersion compensée. Ces fibres compensent l'effet de "chirp" de façon négative ou positive (selon la normalité du milieu dispersif) et permettent ainsi une propagation sans distorsion dans la fibre.

### 6.3 Lasers à solitons

Une propriété intéressante des solitons est l'utilisation des fibres optiques dans le développement de lasers à solitons, i.e des lasers qui émettent des solitons qui auront la capacité d'être transmis sans distorsion. L'idée de base est d'utiliser la fibre optique comme retour dans le laser. L'impulsion ainsi émise est reformée par la fibre de sorte que lorsqu'elle revient au laser, elle est sous la forme d'un soliton fondamental ou d'ordre élevé qui peut être alors transmise sans distorsion dans la fibre de transmission.

### 7.0 Conclusion

- Par ce tour d'horizon, nous avons analysé la propagation d'un signal dans un milieu dispersif linéaire et non-linéaire, étudié la conséquence de la dispersion sur la performance des systèmes de communications optiques, et énuméré quelques techniques utilisées pour réduire la dispersion dans les fibres optiques. Il est à noter surtout que la technologie DWDM, malgré son degré de maturité, n'a pas encore atteint ses limites. De nouvelles techniques en cours de développement permettront de multiplier encore plus les capacités et les performances des systèmes optiques,
- La transmission soliton permettra le transport d'impulsions très étroites sur des milliers de kilomètres sans déformation, tout en conservant une bande passante très large,
- La modulation des impulsions, ou transmission duo-binaire, permettant la multiplication par deux ou trois fois du débit électronique, en utilisant des impulsions à 2 ou 3 niveaux binaires,
- L'amplification et le multiplexage dans la fenêtre 1300 nm (zone où la dispersion est nulle) permettront de mieux rentabiliser les fibres optiques conventionnelles G-652 qui connaissent des limites dans l'utilisation des systèmes DWDM à 1550 nm (zone où l'atténuation est faible mais la dispersion élevée).

### 8.0 Remerciements

Les auteurs aimeraient remercier le Conseil des Ressources en Sciences Naturelles en Génie du Canada pour sa contribution financière.

### 9.0 Références

- [1]. J-P Hamaide et Ph. Emplit, "Limitations in long-haul IM/DD optical fiber systems caused by chromatic dispersion and non-linear Kerr Effect", Electronics Letters, Vol. 26 (18), pp.1451-1453, Aug 1990.
- [2]. A. Yang, X. Li, A. Xu, D. Wu, "Combined impacts of group velocity dispersion, Kerr effect and polarization mode dispersion in optical fibers", Optics Communications, v 214, n 1-6, Dec 15 2003, 2002, p 133-139.
- [3]. G.P Agrawal, "Nonlinear Fiber Optics", Academic Press, San Diego, Ca., 1989.
- [4]. V.E. Zakharov, A.B. Shabat "Exact theory of two-dimensional self-focusing and one-dimensional self-phase modulation of waves in nonlinear media", Sov. Phys. JETP 34, 1972, p 62-69.
- [5]. A. Hasegawa, F. Tappert, "Transmission of stationary nonlinear pulses in dielectric fibers. I. Anomalous dispersion", Appl. Phys. Lett 23, 1973, p 142, - "II. Normal dispersion", Appl. Phys. Lett 23, 1973, p 171-172.
- [6]. L.F. Mollenauer, R.H. Stolen, J.P. Gordon, "Experimental observation of picosecond pulse narrowing and solitons in optical fibers", Phys. Rev. Lett. 45, 1980, p 1095-1098.
- [7]. P. Emplit, J.P. Hamaide, F. Reynaud, C. Froehly, A. Barthelemy, "Picosecond steps and dark pulses through nonlinear single-mode fibers", Opt. Commun. 62, 1987, p 374-376.
- [8]. M. Nakazawa, K. Suzuki, "10 Gbits/s dark soliton data transmission over 200 km", Electron. Lett. 31, 1995, p 1076-1077.
- [9]. Y. Bouslimani, H. Hamam, O. Latry and M. Ketati "CO2 laser beam based technique for producing optical fiber components", SPIE 5260, 154-162.

## *A propos des auteurs*

**Hakim Apithy** a obtenu un baccalauréat d'Ingénierie en génie électrique de l'Université de Moncton (NB, Canada) en 2002. Depuis, il prépare une Maîtrise ès sciences appliquées au sein de la même Université. Il travaille sur l'étude et la conception de composants de fibre optiques. Dans ses travaux de recherche, il s'intéresse à la modélisation de la propagation optique dans de nouveaux composants optiques et à l'élaboration de nouvelles méthodes de fabrication de composants tout fibre. Il est membre du chapitre étudiant de IEEE.



**Yassine Bouslimani** a obtenu un diplôme d'ingénieur en Électronique de l'Université de Batna (Algérie) en 1994, un D.E.A. en Instrumentation et commande de l'INSA de Rouen (France) en 1995, et un diplôme de Doctorat en Optoélectronique en 1999 de l'Université de Rouen (France). Depuis juillet 2000, il est professeur à la Faculté d'ingénierie de l'Université de Moncton au Canada. Entre 1998 et 2000, il a occupé le poste d'attaché temporaire d'enseignement et de recherche (ATER) au département de génie électrique et informatique industrielle de l'IUT de Rouen en France. Ses activités de recherche portent sur les technologies de WDM (Wavelength Division Multiplexing) et de DWDM (Dense WDM). Il est membre de IEEE et de OSA (the Optical Society of America).



**Habib Hamam** a obtenu un B.Ing. et une M.Sc. en traitement de l'information de l'Université Technique de Munich, Allemagne 1988 et 1992, et un Ph.D en télécommunications de l'Université de Rennes I conjointement avec l'École Nationale Supérieure de Bretagne, France 1995. Actuellement, il occupe le poste de professeur agrégé au département de génie électrique de l'Université de Moncton. Dans ses recherches scientifiques, il s'intéresse aux télécommunications optiques, à la diffraction, aux composants de fibres optiques, à l'optique de l'oeil, au génie biomédical et à l'apprentissage par réseaux électronique (E-Learning).

