



## IMPACT DU MELANGE A QUATRE ONDES DANS UNE LIAISON WDM A FIBRE OPTIQUE

A. Boutaleb  
boutaleb\_abdelmadjid@yahoo.fr

A. Temmar  
a\_temmar@hotmail.com

H.Oul-saadi  
oshocine@yahoo.fr

Institut National des Télécommunications et des Technologies  
de l'Information et de la Communication  
BP 1518 El Menouar 31000 Oran.

### Résumé :

Plusieurs phénomènes ont lieu lorsqu'un signal se propage dans une fibre optique : affaiblissement, dispersion chromatique, non linéarité etc. Nous présentons dans cet article les phénomènes de non linéarité dus à l'effet Kerr et aux effets de diffusion. Nous analysons plus spécialement le mélange à quatre ondes FWM (Four Wave Mixing) et nous vérifions quels sont les principaux facteurs qui donnent naissance à ce phénomène. Nous montrons ensuite comment celui-ci affecte les performances des systèmes de télécommunications optiques [1]. Enfin, nous proposons une solution pour limiter les dégradations apportées par le mélange à quatre ondes.

**Mots clés :** non linéarité, effet Kerr, mélange à quatre ondes (FWM), télécommunications optiques, Multiplexage en longueur d'onde (WDM).

### Abstract :

Several phenomena occur when a signal propagates in an optical fiber: attenuation, chromatic dispersion, non linearities, ... We present in this article, the non linear phenomena caused by Kerr effect and diffusion effects. We specially analyse the four wave mixing (FWM) and we verify what are the main factors responsible of this phenomenon. We show afterwards how this one affects the performance of optical telecommunication systems [1]. Lastly, we propose a solution in order to limit degradations provided by the four wave mixing.

**Key words:** non linearity, Kerr effect, four wave mixing, optical telecommunication, Wave-length Division Multiplexing (WDM)

### 1. Introduction

Les phénomènes physiques qui apparaissent dans les systèmes de transmissions optiques sont liés en grande partie à la nature du milieu de propagation des signaux transmis. La fibre optique monomode à base de silice, milieu très faiblement non linéaire mais qui est à l'origine de nombreux effets non linéaires, reste le support privilégié dans les télécommunications optiques.

En effet, comparée aux autres supports de transmission, la fibre optique présente une atténuation très faible sur une très grande plage de fréquences et offre ainsi l'avantage de bandes passantes très larges. Elle permet aujourd'hui de répondre aux besoins sans cesse croissants pour la transmission de débits numériques très importants exigés par la

multiplication de nouveaux services et le développement de l'Internet.

Les effets non-linéaires sont en particulier responsables de la limitation de la puissance utilisable dans les systèmes. En effet à partir de certaines puissances, les effets non linéaires engendrent d'importantes dégradations du signal transmis au point où il serait difficile de récupérer l'information à la réception. Ceci représente un handicap majeur dans la mise en place des liaisons à très grandes distances, notamment les liaisons transatlantiques [2].

Ces non linéarités peuvent généralement être classées en deux catégories [3]:

- les non linéarités dues à l'interaction du champ électrique avec le nuage électronique du matériau : c'est l'effet Kerr.

- les non linéarités dues aux vibrations mécaniques du matériau à cause du champ électrique. Ceux-ci sont liés aux effets de diffusion engendrant l'effet Raman (ou SRS pour Stimulated Raman Scattering) et l'effet Brillouin (SBS pour Stimulated Brillouin Scattering).

Dans ce papier, nous nous intéresserons uniquement à l'effet Kerr à travers le phénomène du mélange à quatre ondes qui sera étudié à l'aide d'un logiciel de simulation après un rappel des concepts théoriques fondamentaux qui lui sont liés. Le logiciel utilisé, COMSIS, est un logiciel de simulation des communications numériques conçu par la société française IPSIS [4].

## 2. l'effet Kerr

Les non linéarités du type Kerr, apparaissent lorsque des puissances élevées sont injectées dans la fibre optique entraînant un fort confinement de l'énergie dans un petit diamètre de mode et s'accompagnant d'une variation de l'indice de réfraction  $n$  de la fibre exprimée par la relation :

$$n = n_0 + n_2 \left( \frac{P}{A_{eff}} \right) \quad (1)$$

Avec :

$n_0$ , indice de réfraction de la fibre à un niveau normal de puissance.

$n_2$ , coefficient de non linéarité Kerr, en  $m^2/W$  ( $n_2 = 3,2 \cdot 10^{-20}$  pour la silice).

$P$ , puissance optique qui traverse la fibre.

$A_{eff}$ , surface effective de la section de la fibre.

La surface effective  $A_{eff}$  est un paramètre étroitement lié aux non linéarités de la fibre optique et est définie par la relation suivante :

$$A_{eff} = \frac{2\pi \int_0^{\infty} I(r) r dr}{\int_0^{\infty} I(r)^2 r dr} \quad (2)$$

où  $I(r)$  est la distribution des intensités de champ du mode fondamental de la fibre au rayon  $r$  définie par :

$$I(r) = \exp\left(-\frac{2r^2}{w^2}\right) \quad (3)$$

où  $2w$  est le diamètre du champ de mode (MFD, mode field diameter).

La recommandation G.650.2 de l'Union Internationale des Télécommunications (UIT-T) donne une relation empirique de  $A_{eff}$  [5].

$$A_{eff} = k\pi w^2 \quad (4)$$

Où  $k$  est un facteur de correction dépendant de la longueur d'onde et de certains paramètres de la fibre optique. Typiquement,  $A_{eff}$  varie entre 20 et 100  $\mu m^2$  dans la fenêtre optique  $\lambda = 1,55 \mu m$  selon le type de fibre.

L'effet Kerr est à l'origine de nombreux phénomènes physiques :

- L'auto-modulation de phase (ou SPM pour Self Phase Modulation) qui se traduit par un élargissement de l'onde à cause de la variation de l'indice de réfraction en fonction de la puissance. Ce phénomène engendre la création d'interférences et une modulation de phase parasite. Il apparaît lorsqu'il y a propagation d'une seule onde.
- La modulation de phase croisée (ou XPM pour Cross Phase Modulation) : engendrée par la variation non linéaire de la phase du champ électrique d'un signal lumineux induite par le champ électrique d'un autre signal qui se propage simultanément dans la fibre.
- Le mélange à quatre ondes qui apparaît lorsque deux ou plusieurs ondes, se propageant ensemble, interagissent et donnent naissance à des ondes parasites.

La modulation de phase croisée et le mélange à quatre ondes apparaissent dans un système multi-canaux du type WDM.

## 3. Le mélange à quatre ondes

Le mélange à quatre ondes, appelé aussi mélange à quatre photons, est un processus non linéaire au cours duquel des ondes de pulsations distinctes interagissent. Il apparaît lorsque deux ou plusieurs longueurs d'ondes se propagent simultanément dans une fibre optique et se trouvent momentanément en accord de phase.

Au fur et à mesure de la propagation, le mélange à quatre ondes se traduit par un transfert d'énergie au profit de l'apparition de

canaux parasites dont l'amplitude devient de plus en plus importante le long de la fibre.

Ces nouvelles composantes, si elles se superposent sur les canaux utiles, provoquent des dégradations considérables.

L'intensité du mélange à quatre ondes dépend de plusieurs paramètres. Les plus importants d'entre eux sont :

- la puissance injectée dans la fibre.
- l'espacement entre canaux WDM
- la dispersion chromatique.
- la longueur de la liaison optique

Dans le cas particulier de trois ondes de fréquences respectives  $f_1, f_2,$  et  $f_3,$  le FWM se traduit telles que

$$f_{fwm} = f_1 + f_2 - f_3 \quad (5)$$

L'ordre de ces fréquences est  $f_1, f_{fwm}, f_3$  et  $f_2.$

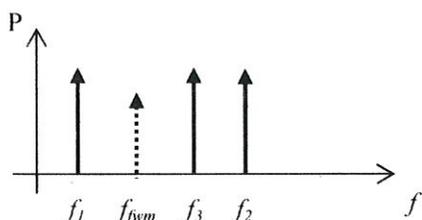


Fig 1 : exemple d'apparition d'une fréquence parasite  $f_{fwm}$

D'autres combinaisons à partir de l'équation 6 donnent naissance à un nombre plus important de fréquences parasites.

$$f_{fwm} = f_1 \pm f_2 \pm f_3 \quad (6)$$

Par ailleurs, les recommandations G.650.2 [5] et G.663 [6] de l'UIT-T définissent un coefficient  $\eta$  pour exprimer le rendement du mélange à quatre ondes (relation 7)

$$\eta \cong \left[ \frac{n_2 P}{A_{eff} D(\Delta\lambda)^2} \right]^2 \quad (7)$$

où

$D,$  dispersion chromatique de la fibre  
 $\Delta\lambda,$  espacement des canaux

Cette relation, sur la base de laquelle le phénomène du mélange à quatre ondes sera simulé, est valable dans l'hypothèse où la puissance d'entrée et l'espacement sont les mêmes pour tous les canaux [5]. Les résultats des simulations sont présentés dans le paragraphe 4.

#### 4. Résultats des simulations et commentaires

Afin d'aboutir à une interprétation plus significative, nous avons choisi de représenter les signaux simulés par leur densité spectrale de puissance (DSP).

Dans cette simulation, nous avons envoyé le multiplex de quatre ondes prises dans la fenêtre de fonctionnement à 1550 nm (entrée WDM à quatre canaux) à travers une fibre optique standard du type G.652. Les canaux, choisis avec une puissance commune égale à 10 dBm, sont espacés l'un de l'autre de 0.8 nm.

Le système simulé reposant sur le module « entrée WDM » de la bibliothèque optique de COMSIS est représenté par le schéma bloc de la figure 2.

##### 4.1 Simulation sans compensation

Dans une première étape, nous avons choisi de montrer la dépendance du phénomène FWM vis-à-vis de la longueur de la fibre, de la puissance des canaux et enfin de l'espacement entre ces derniers. Trois séries de simulations ont été effectuées, Les signaux simulés sont prélevés au niveau de la sortie 1 (figure 2).

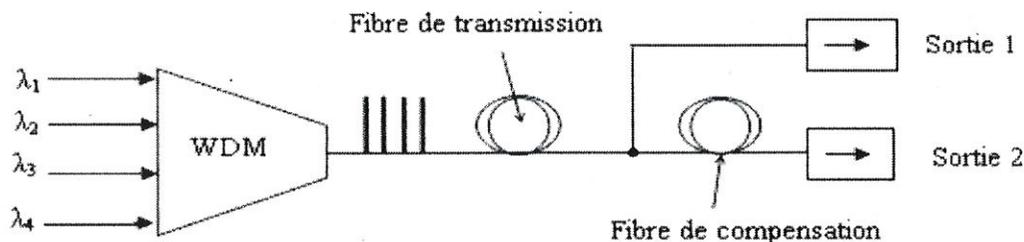


Fig 2 : système simulé



• **Variation de l'effet FWM en fonction de la longueur (L) de la fibre:**

On maintient les paramètres de l'entrée WDM constants (04 canaux, P=10 dBm, espacement entre canaux=100 GHz, longueur d'onde centrale = 1550 nm) et on fait varier la longueur de la fibre. Le résultat obtenu illustré par la courbe *a* de la figure 3, montre que l'effet FWM augmente avec la longueur de la fibre de transmission et reste négligeable pour une longueur de celle-ci inférieure à 22 Km environ.

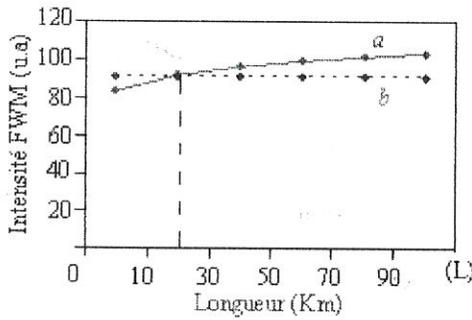


Fig 3 : FWM en fonction de la Longueur de la fibre.

• **Variation de l'effet FWM en fonction de la puissance (P) de chaque canal:**

La longueur de la fibre étant fixée à 100 km, on fait varier la puissance des canaux WDM tout en maintenant les autres paramètres constants. Le résultat obtenu montre que l'effet FWM augmente avec la puissance et commence à devenir contraignant pour une valeur de celle-ci égale à environ 1 mW (courbe *a* de la figure 4).

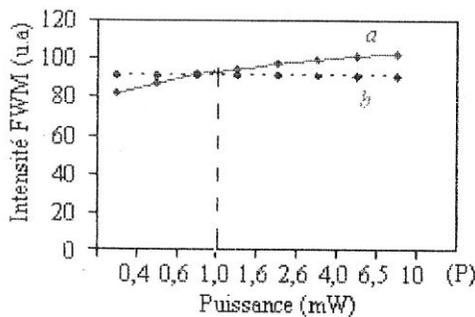


Fig 4 : FWM en fonction de la puissance

• **Variation de l'effet FWM en fonction de l'espacement entre canaux ( $\Delta\lambda$ ):**

On maintient tous les paramètres constants et on fait varier l'espacement

entre canaux WDM. Le résultat obtenu montre que l'effet FWM diminue avec l'agrandissement de l'espacement entre canaux. Le signal se dégrade sérieusement pour tout espacement inférieur à 60 GHz environ (figure 5).

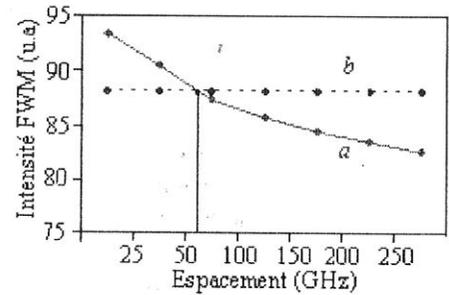


Fig 5 : FWM en fonction de L'espacement entre canaux WDM

La courbe *b* en traits pointillés dans chaque cas, montre la limite critique au dessus de laquelle le FWM ne peut plus être négligé. Le critère sur lequel nous sommes basé repose sur l'hypothèse qu'une raie parasite commence à être contraignante lorsque le rapport de son intensité par rapport à celle de la composante fondamentale de l'onde utile est supérieur à 25%. Les raies parasites engendrées par le FWM apparaissent à la sortie de la fibre de transmission. La comparaison entre le signal original (figure 6), et le signal à la sortie de la fibre de transmission (figure 7) illustre le phénomène observé qui évolue comme montré précédemment. En effet, on constate que le signal original, en traversant la fibre de transmission, subit une dégradation remarquable matérialisée par l'apparition de raies parasites sur ses flancs. Ces raies, si elles ne sont pas neutralisées, auront un impact très pénalisant sur la qualité du signal transmis. Pour éviter cet état de fait, il faut compenser le phénomène physique qui est à l'origine de son apparition.

Nous avons été amené donc, à proposer une solution que nous décrivons dans le paragraphe suivant.

**4.2 Simulation avec compensation**

La solution proposée consiste à introduire une fibre compensatrice à la suite de la fibre de transmission. Les signaux sont prélevés dans ce cas au niveau de la sortie 2 (figure 2).

Afin d'éviter l'apparition d'effets non-linéaires additionnel, on fixe la longueur de la fibre compensatrice à 20 Km (*figure 3*). La puissance commune aux quatre canaux WDM et l'espacement entre eux sont fixés respectivement à 10 mW et 100 GHz.

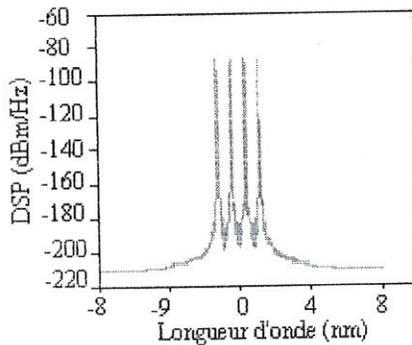


Fig 6 : multiplex WDM original

La simulation consiste à chercher une valeur optimale de la dispersion chromatique. Celle-ci est définie par une fonction de la longueur d'onde qui permet d'introduire la pente de dispersion (8).

$$D(\lambda) = D_0 + S(\lambda - 1550) \quad (8)$$

Avec  $D_0$  est la dispersion chromatique à 1550 nm et  $S$  la pente de la dispersion.

La simulation est effectuée pour quatre valeurs de  $D_0$  (-20, -40, -60, -80) et une seule valeur de  $S$  (-0,5). Les courbes a, b, c et d obtenues à la sortie de la fibre compensatrice (*figure 8*) montrent qu'avec une dispersion négative  $D$  de l'ordre de -85 ps/nm/km, on réussit à compenser complètement l'apparition du FWM sans tenir compte de la pente de dispersion. Une diminution significative du phénomène est observée pour des valeurs de  $D$  plus faible. Ces courbes, comparées au signal original (*figure 6*), montrent que les raies parasites disparaissent progressivement avec l'augmentation de la valeur absolue de la dispersion.

Ce résultat est un compromis entre l'influence de la dispersion chromatique (effet linéaire) et celle de l'effet Kerr (effet non linéaire). En effet, la dispersion de la fibre de transmission (17 ps/nm/km) empêche l'apparition de l'accord de phase et contribue de ce fait à limiter les effets du FWM.

La dispersion totale cumulée le long des 100 km de la fibre de transmission

(100 km x 17 ps/nm/km = 1700 ps/nm) peut être complètement compensée par un tronçon de 20 km de fibre compensatrice, grâce à sa dispersion chromatique négative (20 km x -85 ps/nm/km = -1700 ps/nm).

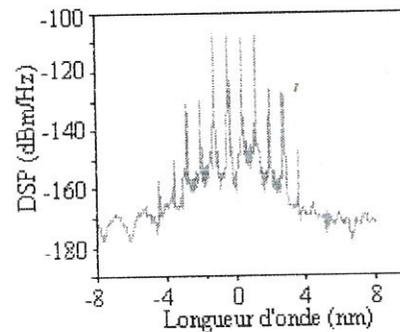


Fig 7 : multiplex WDM (sortie de la fibre de transmission)

## 5. Conclusion et perspectives

De nos jours, plusieurs techniques ont été proposées pour réduire les dégradations générées par le mélange à quatre ondes [7], [8], [9]. Malheureusement, leur mise en œuvre se confronte souvent à des problèmes compromettants liés à des considérations d'ordre technologique ou économique.

Dans cet article, nous avons repris l'approche qui semble être la plus prometteuse et qui consiste à empêcher l'apparition momentanée de l'accord de phase entre les différentes longueurs d'ondes par une gestion adéquate de la dispersion chromatique.

Des compromis similaires à celui présenté dans cette étude peuvent être envisagés pour d'autres types de fibres de transmission.

Pour une mise en œuvre simple et pratique, notamment dans les liaisons déjà existantes, on peut envisager l'utilisation d'une fibre compensatrice qui doit avoir une longueur relativement courte de manière à pouvoir l'insérer facilement dans la liaison.

L'insertion d'un tronçon en aval et d'un autre en amont de la fibre de transmission contribuerait à la réduction de la longueur de la fibre de compensation à insérer. On peut aspirer à de meilleurs résultats si le tronçon de la fibre de compensation inséré présenterait une surface effective de mode et une dispersion chromatique négative suffisamment grandes avec un indice de non linéarité  $n_2$  suffisamment faible.

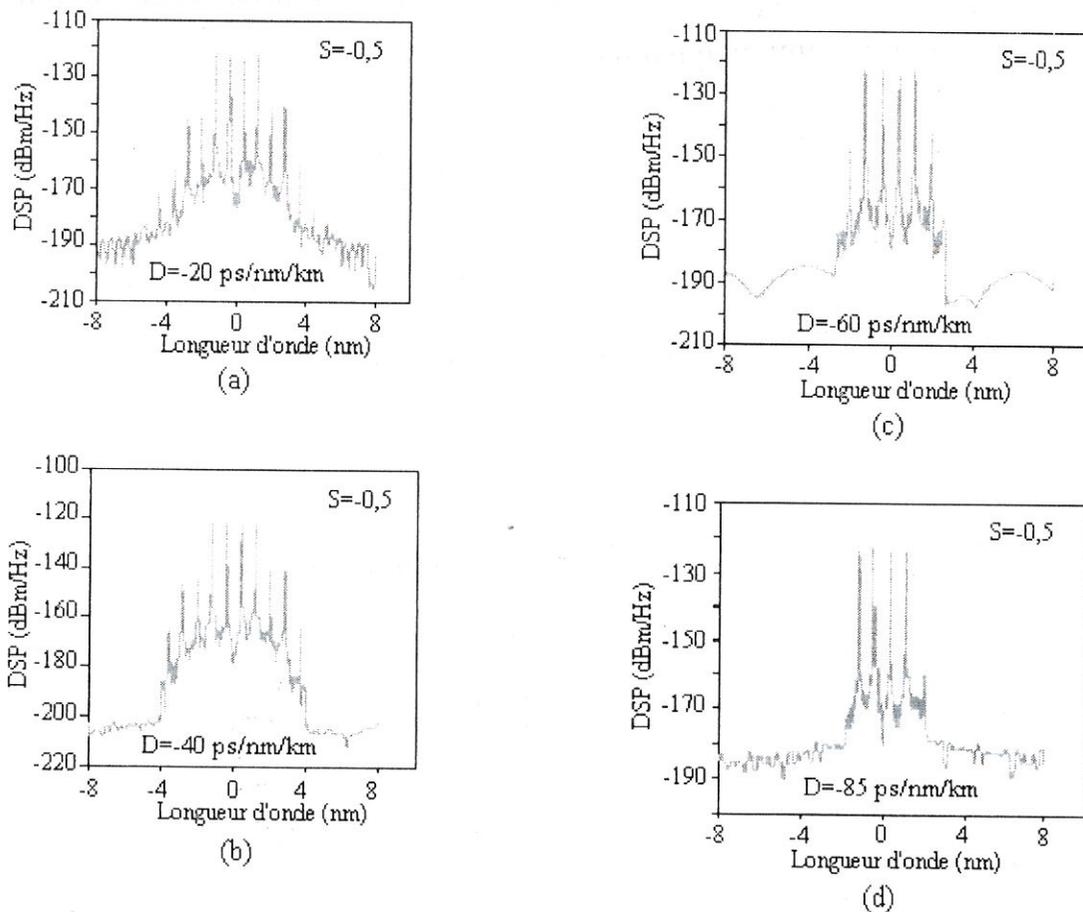


Fig 8 : compensation de l'effet FWM par optimisation de la dispersion chromatique  $D$  de la fibre de compensation.

## 6. Références bibliographiques

- [1] A.V. Ramprasad & M. Meenakshi, "Four wave mixing on DWDM optical systems" Academic Open Internet, Volume 17, 2006.
- [2] Ivan Kaminow, Tingye Li, "Optical fiber telecommunications IVB. Systems and impairments", Academic Press, 2002.
- [3] M. Joindot, I. Joindot, "Systèmes de transmission sur fibre optique", TE 7 115, 2000.
- [4] COMSIS de IPSIS, [www.ipsis.com](http://www.ipsis.com)
- [5] UIT (Union International des Télécommunications), "Définitions et méthodes de test applicables aux attributs se rapportant, aux caractéristiques statistiques et non linéaires des fibres et câbles optiques monomodes", appendice II, attributs non linéaires, UIT-T G.650.2, p. 43-47, Janvier 2005.
- [6] UIT (Union International des Télécommunication) "Aspects relatifs aux applications

- des sous-systèmes et dispositifs amplificateurs optiques", Appendice II, aspects relatifs à la transmission, UIT-T G.663, p. 11-23, Avril 2000.
- [7] M. Forkan Uddin, B.M. Nasirud Doulah, "Reduction of four wave mixing in an optical WDM system by controlling channel spacing and chromatic dispersion.", ICECE 2002, 26-28 December 2002, Dhaka, Bangladesh.
- [8] Leonardo Didier Coelho, "Non linear limits to the information capacity of optical fiber communications", seminar on topics in communications engineering, University of Technology Munich, Janvier 2005.
- [9] Vrizlynn L. Thing, P. Shum, M.K. Rao, "Channel allocation algorithm for WDM systems", Vol. 11, Optics Express 1322, 2 June 2003.