

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'enseignement Supérieur

Et de la Recherche scientifique

Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued

Faculté de Technologie

Mémoire de Fin d'Étude

En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Science et Technologie

Filière : Télécommunications

Spécialité : Systèmes de télécommunications

Réalisé par :

LIFA Ishak & DERBIKH Lina & NEDJAI Hania & AYADI Sourour

Thème :

**Simulation de la transmission des données
sur fibre optique via la transformée de
Fourier non-linéaire**

Devant le jury composé de:

Dr. HIMA Abdelkader

Dr. CHEMSA Ali

Dr. MEDJOURI Abdelkader

MCB

MCA

MCA

**Président
Examineur
Encadreur**

Juin 2022

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

شكرتكم

مصادقا لقول نبينا الكريم صلى الله عليه وسلم " لا يشكر الله من لا يشكر الناس "

نشكر الله تعالى على فضله .الحمد لله رب العالمين

حمداً لشكره أداءً ولحقه قضاءً، ولحبه رجاءً ولفضله نماءً ولثوابه عطاءً.

كما نتقدم بخالص الشكر لكل من كان له فضل علينا ممن علمونا أول حرف حتى أوصلونا لما نحن عليه اليوم

أساتذة ومعلمين وناصحين.

إلى كل من علمنا أن المثابرة أساس كل نجاح

شكر خاص للأستاذ الدكتور " مجوري عبد القادر " الذي أشرف على مذكرتنا، ولم يبخل علينا بوقته ونصائحه وتوجيهاته القيمة.

لهم جميعا ولكل من كان سندا لنا جزيل الشكر.

Sommaire

Remerciement	
Sommaire.....	i
Liste des acronymes	iv
Liste des symboles mathématiques	viii
Liste des figures et tableaux	x
Résumé	xii
Introduction générale.....	1
Chapitre I : Généralités sur les fibres optiques	
I.1. Introduction.....	03
I.2. Les Avantage des fibres optiques.....	04
I.3. Architecture d'une liaison à fibre optique.....	04
I.4. Eléments de bases des réseaux optiques.....	05
I.5. Fibre optique.....	06
I.5.1. Structure de la fibre optique.....	06
I.5.2. Les types de fibres optiques.....	07
I.5.3. Le principe de propagation	09
I.5.4. Caractéristiques de propagation sur fibre optique	09
I.5.4.1. Les effets linéaires.....	09

I.5.4.1.1. L'atténuation dans les fibres optiques.....	10
I.5.4.1.2. La dispersion.....	11
I.5.4.2. Les effets non-linéaires	16
I.5.4.2.1. L'effet Kerr	16
I.5.4.2.2. Les effets de la diffusion stimulée.....	17
I.5.4.2.3. Équation de Schrödinger non-linéaire	18
I.6. Conclusion	18

Chapitre II : La transformée de Fourier non-linéaire

II.1. Introduction.....	19
II.2. Système de communication optique cohérent.....	20
II.3. Modèle de canal	20
II.3.2. Équation de Schrödinger non-linéaire normalisée	22
II.4. Transformée de Fourier non-linéaire	23
II. 4.1. La méthode de Fourier pour résoudre des équations aux dérivées partielles linéaires.....	23
II. 4.2. La méthode de diffusion inverse pour résoudre équations aux dérivées partielles Non-linéaire	25
II.4.3. Problème de diffusion inverse (scattering).....	26
II.4.3.1. Transformée de Fourier non-linéaire pour l'équation de Schrödinger non-linéaire	27
II.4.4. Transformée de Fourier non-linéaire directe	27

II.5. Transformée de Fourier non-linéaire inverse	33
II.6. Multiplexage par répartition en fréquence non-linéaire NFDM.....	34
II.7. Conclusion.....	35
Chapitre III : Simulation de la transmission des données sur fibre optique via la	
transformée de Fourier non-linéaire	
III.1. Introduction.....	36
III.2. Description de NFDMLAB.....	36
III.3. Démonstration expérimental du système de transmission optique basé sur NFDM.....	39
III.3.1. Conception de signaux NFDM.....	39
III.3.2. Système à simuler	40
III.3.3 Les paramètres de simulation	42
III.4. Conclusion	49
Conclusion générale.....	50
Références bibliographiques.....	52

Liste des acronymes

ASE	Amplified Spontaneous Emission	Emission Spontanée Amplifiée
AWGN	Additive White Gaussian Noise	Bruit Gaussien Blanc Additif
BER	Bit Error Rate	le Taux d'Erreur Binaire
BW	Band Width	Bande Passante
CS	Continuous Spectrum	Spectre Continu
DBP	Digital Back Propagation	Rétro-Propagation Numérique
DPC	Dispersion Pre-Compensation	Pré-Compensation de la Dispersion
DS	Discrete Spectrum	Spectre Discret
DSP	Digital Signal Processing	Traitement des Signaux Numériques
EDFA	Erbium-Doped Fibre Amplifiers	Amplificateurs à Fibre Dopée à l'Erbium
EVM	Error Vector Magnitude	Magnitude du Vecteur d'Erreur
FFT	Fast Fourier Transform	Transformée de Fourier Rapide
FTTX	Fiber To The x	Fibre jusqu'à x
FTTN	Fiber To The N	Fibre jusqu'à N
FTTH	Fiber To The Home	Fibre jusqu'à Maison
FTTB	Fiber To The Building	Fibre jusqu'à Bâtiment

FNFT	F ast N onlinear F ourier T ransform	T ransformée de F ourier N on- linéaire R apide
FWM	F our- W ave M ixing	M élange à Q uatre O ndes
GLM	G elfan- L evitan- M archenko	G elfan- L evitan- M archenko
GVD	G roup V elocity D ispersion	D ispersion de la V itesse de G roupe
HDFEC	H ard D ecision F orward E rror C orrection	C orrection d' E rreur D irecte de D écision dure
IFT	I nverse F ourier T ransform	T ransformée de F ourier I nverse
IFFT	I nverse F ast F ourier T ransform	T ransformée de F ourier R apide I nverse
INFT	I nverse N onlinear F ourier T ransform	T ransformée de F ourier N on- linéaire I nverse
IST	I nverse S cattering T ransform	T ransformée de D iffusion I nverse
KDV	K orteweg-de V ries	K orteweg de V ries
NFDM	N onlinear F requency D ivision M ultiplexing	M ultiplexage par R épartition en F réquence N on-linéaire
NF	N oise F igure	F igure de B ruit
NFT	N onlinear F ourier T ransform	T ransformée de F ourier N on- linéaire
NIS	N onlinear I nverse S ynthesis	S ynthèse I nverse N on-linéaire

Liste des acronymes

NLSE	Nonlinear Schrödinger Equation	Equation de Schrödinger Non- Linéaire
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing	Multiplexage par Répartition en Fréquence Orthogonal
OOK	On-Off Keying	Clé Marche-Arrêt
PAM	Pulse Amplitude Modulation	Modulation d'Amplitude d'Impulsion
PAPR	Peak-to-Average Power Ratio	Rapport de Puissance Crête à Moyenne
PDE	Partial Differential Equation	Différentes Partie de l'Equation
PDF	Probability Distribution Function	Fonction de Distribution de Probabilité
PMD	Polarization Mode Dispersion	Dispersion Modale de Polarisation
PMDC	Polarization Mode Dispersion Compensation	Compensation de Dispersion du Mode de Polarisation
PNFT	Periodic Nonlinear Fourier Transform	Transformée de Fourier Non- linéaire Périodique
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying	Modulation par Déplacement de Phase en Quadrature
RMS	Root-Mean-Square	Racine carrée Moyenne

SDFEC	Soft Decision Forward Error Correction	Correction d'Erreur Directe de Décision Douce
SER	Symbol Error Rate	Taux d'Erreur de Symbole
SMF	Single-Mode Fibre	Fibre Monomode
SNR	Signal-to-Noise Ratio	Rapport Signal sur Bruit
SPM	Self-Phase Modulation	Auto Modulation de Phase
SSMF	Standard Single-Mode Fibre	Fibre Monomode Standard
VNT	Variance Normalizing Transform	Transformation de Normalisation de la Variance
WDM	Wavelength Division Multiplexing	Multiplexage en Longueur d'Onde
WAN	Wide Area Network	Réseau a Grande Distance
XPM	Cross-Phase Modulation	Modulation en Phase Croisée

Liste des symboles mathématiques

α : Coefficient de perte de fibres

$\beta(\omega)$: Constante de propagation de mode

β_i : $i^{\text{ème}}$ dérivée de la constante de propagation

β_2 : Dispersion de la vitesse de groupe

γ : Paramètre de non-linéarité de la fibre

$\Gamma L(t)$: Bruit dans la méthode de signalisation basée sur GLM

$\delta(\cdot)$: Fonction delta de Dirac

ΔT_l : Largeur temporelle du signal à la longueur l

$\Delta\beta_1$: Différence de vitesse de groupe inverse de deux états de polarisation

ΔT_l : Approximation linéaire de la largeur temporelle du signal à la longueur l

κ : Nombre d'échantillons dans la méthode de signalisation basée sur GLM

λ : Fréquence non-linéaire paramètre spectral du problème de Zakharov-Shabat

λ_m : Valeurs propres discrètes

λ_κ : Fréquence non-linéaire aux points de symbole pour CS

Λ : Largeur spectrale

ν_0 : Fréquence porteuse

$\rho(\lambda)$: Spectre continu

$\rho_0(\lambda)$: Spectre continu d'entrée

$\tilde{\rho}_L(\lambda)$: Spectre continu reçu après suppression du déphasage

$\hat{\rho}_L(\lambda)$: Version filtrée linéairement de $\tilde{\rho}_L(\lambda)$

ρ : Rapport signal sur bruit pour la communication soliton

σ^2 : Normaliser la densité spectrale de puissance de bruit ASE

σ_N^2 : Densité spectrale de puissance de bruit ASE normalisée accumulée à la réception

σ_0^2 : Puissance de bruit ASE de normalisation accumulée au niveau du récepteur

$\eta_L(\lambda)$: Bruit effectif ajouté au CS

τ : Temps (non normalisé)

ϕ : Vecteur de fonction propre aux limites du problème de Zakharov-Shabat

ψ : Vecteur de fonction propre aux limites du problème de Zakharov-Shabat

ψ_ρ : Déphasage dû à la PMD

ω : Fréquence angulaire

ω_0 : Fréquence angulaire porteuse

$A(\omega)$: Matrice de Jones

A_ρ : Contrainte d'amplitude maximale pour CS

A : Amplitude des solitons transmis

$A_{max/min}$: Contrainte d'amplitude maximale/minimale des solitons

\bar{A} : Amplitude des solitons reçus

$a(\lambda, z)$: Coefficient de Fourier non-linéaire

$b(\lambda, z)$: Coefficient de Fourier non-linéaire

B : Bande passante de signal normalisée

c = Vitesse de la lumière

$C_m(z)$: Constantes de normalisation

c : Capacité

C_R : Capacité du canal réel

C_{PP} : Puissance de crête capacité limitée pour la communication soliton

C_A : Capacité asymptotique pour la communication soliton

D : Paramètre de dispersion chromatique des fibres

\mathcal{D} : Opérateur dérivé temporel

D_P : Paramètre PM

D_0 : Séquence de symboles d'entrée pour les systèmes basés sur NFT

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.1 : Liaison optique point à point.....	04
Figure I.2 : Différents types de réseau public.....	06
Figure I.3 : Structure d'une fibre optique.....	07
Figure I.4 : fibre a saut d'indice.....	07
Figure I.5 : fibre a gradient d'indice.....	08
Figure I.6:les types des fibres selon les modes de propagation.....	08
Figure I.7: propagation du signal dans une fibre optique.....	09
Figure I.8 : Effet de l'atténuation.....	10
Figure I.9 : les différentes sources d'atténuation dans les fibres de silice.....	11
Figure I.10 : Schéma de principe décrivant la dispersion de mode de polarisation.....	14

Chapitre II

Figure II.1 : Structure générale d'un système de communication optique cohérent.....	20
Figure II.2 : Schéma de la méthode de Fourier pour résoudre l'IVP pour les EDP linéaires....	24
Figure II.3 : Schéma de la méthode de diffusion inverse pour résoudre l'IVP pour le NLSE...	25
Figure II.4 : Valeur absolue des amplitudes spectrales continue (bleu) et discrète (rouge) correspondant aux fréquences non-linéaires $\lambda \in \mathbb{R}$ et les valeurs propres discrètes $\lambda_i \in \mathbb{C}^+$, $i =$ 1, 2, 3.....	30
Figure II.5 : Évolution non-linéaire du signal $q(t, z)$ dans le domaine temporel et évolution correspondante du spectre non-linéaire associé dans le domaine non-linéaire	31
Figure II .6 : Un schéma NFDM typique.....	34

Chapitre III

Figure III.1 : Captures d'écran tirées d'un notebook NFDMLAB Jupyter.....37

Figure III.2 : Vue d'ensemble des composants de NFDMLAB.....37

Figure III.3 : Représentation schématique du noyau Python. Les flèches indiquent un flux de travail typique.....38

Figure III.4 : Configuration de transmission en laboratoire avec boucle de fibre composée de 3 portées NZDSF de 24 km et d'amplificateurs EDFA. Émetteur : DAC 88 GSa/s, récepteur : hybride optique à polarisation simple et oscilloscope à bande passante de 33 GHz.....41

Figure III .5 : signal d'entrée de fibre.....42

Figure III.6 : signal de sortie de fibre.....42

Figure III.7 : spectre de Fourier non-linéaire du premier bloc.....43

Figure III.8 : diagramme de constellation.....43

Liste des tableaux

Chapitre III

Tableau 1: l'ensemble de 7 valeurs propres du spectre discret des formes d'onde.....40

Résumé

Cette étude vise à simuler la transmission de données sur des fibres optiques via la transformée de Fourier non-linéaire, où la transformée de Fourier non-linéaire est une méthode de résolution d'équations différentielles intégrables qui peuvent modéliser la propagation des ondes dans des milieux non-linéaires tels que l'équation de Schrödinger. Dans le but d'augmenter la capacité des réseaux optiques, les effets non-linéaires (effet Kerr) et NFT ont été exploités dans le développement de la technologie de multiplexage par répartition en fréquence non-linéaire (NFDM) utilisant (NFT) pour coder les informations dans le spectre non-linéaire.

Mots clés: fibres optiques, effets non-linéaires, équation de Schrödinger, transformée de Fourier non-linéaire, multiplexage par répartition en fréquence non-linéaire.

Abstract

This study aims to simulate the transmission of data over optical fibers via the nonlinear Fourier transform, where the nonlinear Fourier transform is a method for solving integrable differential equations that can model wave propagation in nonlinear media. Such as the Schrödinger equation. With the aim of increasing the capacity of optical networks, nonlinear effects (Kerr effect) and NFT have been exploited in the development of nonlinear frequency division multiplexing (NFDM) technology using (NFT) to encode information in the nonlinear spectrum.

Keywords: optical fibers, nonlinear effects, Schrödinger equation, nonlinear Fourier transform, nonlinear frequency division multiplexing.

ملخص

تهدف هذه الدراسة إلى محاكاة نقل البيانات عبر الألياف الضوئية عبر تحويل فورييه اللاخطي ، حيث يعتبر تحويل فورييه غير الخطي طريقة لحل المعادلات التفاضلية القابلة للتكامل والتي يمكن أن تمثل نموذجًا لانتشار الموجات في الوسائط غير الخطية مثل معادلة شرودنجر. بهدف زيادة قدرة الشبكات الضوئية ، تم استغلال التأثيرات غير الخطية (تأثير كير) و NFT في تطوير تقنية تعدد الإرسال بتقسيم التردد اللاخطي (NFDM) باستخدام (NFT) لتشفير المعلومات في الطيف غير الخطي.

كلمات البحث: الياف بصرية ، تأثيرات غير خطية، معادلة شرودنجر، تحويل فورييه غير الخطي، تعدد الإرسال

بتقسيم التردد غير الخطي

Introduction

Générale

Introduction générale

Les systèmes de communication par fibre optique sont nés dans les années 1960 grâce aux inventions des lasers et les applications des fibres de verre, La transmission des données sur fibre optique a révolutionné le monde des télécommunications et a joué un rôle majeur dans l'avènement de l'ère de l'information en offrant des solutions permettant de soutenir l'explosion de la demande en bande passante induite par le développement de l'Internet et de satisfaire la demande croissante en termes de débits. Les raisons de l'énorme succès de la transmission par fibre optique sont liées aux éléments suivants : large bande passante, immunité aux interférences électromagnétiques, atténuation réduite, faible coût, dimensions réduites et fiabilité accrue.

Les fibres ont des effets qui réduisent de qualité de transmission, qui sont les effets linéaire (dispersion chromatique et intermodale) et non-linéaire (effet Kerr). Et dans notre travail on va concentrer sur les effets non-linéaires. La propagation du signal dans une fibre optique est généralement modélisée par l'équation de Schrödinger non-linéaire (NLSE) qui caractérise l'interaction entre la dispersion et la non-linéarité de Kerr dans le canal.

Le facteur non-linéaire a une grande influence sur la transmission de la fibre optique sous la condition d'une grande distance de propagation, d'une faible perte et d'une faible concentration de puissance optique dans le cœur de la fibre optique. Certains effets correspondent à l'interaction entre le champ électrique et le nuage d'électrons matériel, et ils sont regroupés selon le terme de l'effet Kerr. D'autres impliquent des vibrations mécaniques des noyaux et des matériaux atomiques, ces vibrations sont provoquées par l'excitation du champ électrique. C'est l'effet Raman (SRS : Stimulated Raman Scattering).

Dans le but d'augmenter l'efficacité spectrale au-delà des limites actuelles causées par la non-linéarité Kerr de la fibre, l'attention s'est récemment portée sur le multiplexage par

répartition en fréquence non-linéaire (NFDM) [1-3]. Le démultiplexage et le multiplexage d'un signal NFDM sont effectués par la transformée de Fourier non-linéaire (NFT) et son inverse, respectivement [1-3]. La modulation des amplitudes spectrales de multi-solutions (avec valeurs propres uniquement) a été démontrée expérimentalement sur une fibre monomode. De plus, le traitement non-linéaire de NFT provoque une amélioration des perturbations dans le spectre non-linéaire à partir de petites perturbations dans le domaine temporel.

Dans ce mémoire, nous proposons l'étude de transmission des données sur fibres optiques via la transformée de Fourier non-linéaire, Ceci est considéré comme l'une des études récentes, car il a commencé les dernières années. Ce mémoire s'organise en trois chapitres :

Le premier chapitre évoque, des notions générales concernant la fibre optique, ses différents types et ses applications et également abordé les communications optiques et puis on a consacré à l'étude des effets non-linéaires dans les fibres optiques en l'occurrence l'effet Kerr, ainsi que l'équation de Schrödinger.

Le deuxième chapitre est consacré à l'étude de la transformée de Fourier non-linéaire et la technique de multiplexage par répartition en fréquence non-linéaire.

En ce qui concerne le troisième chapitre, il contient une description de NFDMLab et une simulation de transmission des données sur fibres optiques via la transformée de Fourier non-linéaire déterminées par 7 valeurs propres sur le système d'exploitation Linux Ubuntu 21.04 et la plate-forme NFDMLab.

Chapitre I

Généralités sur les fibres

optiques

I.1. Introduction

Depuis sa première application fructueuse au début des années 1950, la fibre optique a supplanté le câble coaxial dans la plupart des réseaux de télécommunications sur support. Les fibres optiques possèdent, dans la fenêtre spectrale généralement utilisée, une bande utilisable très importante (environ 15 THz autour de la longueur d'onde 1,55 μm). Théoriquement, les débits qui peuvent être transmis sont donc extrêmement élevés. C'est d'autant plus intéressant qu'aujourd'hui le nombre et la taille des informations échangées sont de plus en plus importants. Cela a permis aux communications optiques d'être plus utilisables.

Dans ce chapitre on va voir les caractéristiques de fibre optique et le principe de propagation des ondes dans une fibre optique et les phénomènes qui les subissent.

I.2. Avantage des fibres optiques

La fibre optique est vite apparue très intéressante pour le domaine des télécommunications. Elle représente un support de transmission dont les nombreux avantages justifiant son introduction dans les systèmes de transmission sont donnés ci-après:

Performances de transmission: Très faible atténuation (le plus moins atténuation quand la longueur d'onde est 1,55 μm), très grande bande utilisable (débit très élevée jusqu'à 10 Tb/s dans la 4^{ème} génération), Multiplexage possible. [11]

Avantages de mise en œuvre: Très petite taille, grande souplesse, faible poids. [11]

Sécurité électrique: Isolation totale entre terminaux, utilisation possible en ambiance explosive ou sous fortes tensions. [11]

Sécurité électromagnétique: Insensible aux parasites et n'en crée pas, inviolabilité presque totale. [11]

Avantage économique: Moindre coût, en comparaison des autres supports. [11]

I.3. Architecture d'une liaison à fibre optique

L'architecture d'une liaison, quel que soit le niveau du réseau auquel elle est destinée, est composée des mêmes briques de base.

La fibre optique véhicule les impulsions optiques entre l'émetteur et le récepteur, qui sont les extrémités des systèmes de transmission point à point. Les liaisons point à point constituent l'armature des réseaux optiques. [7]

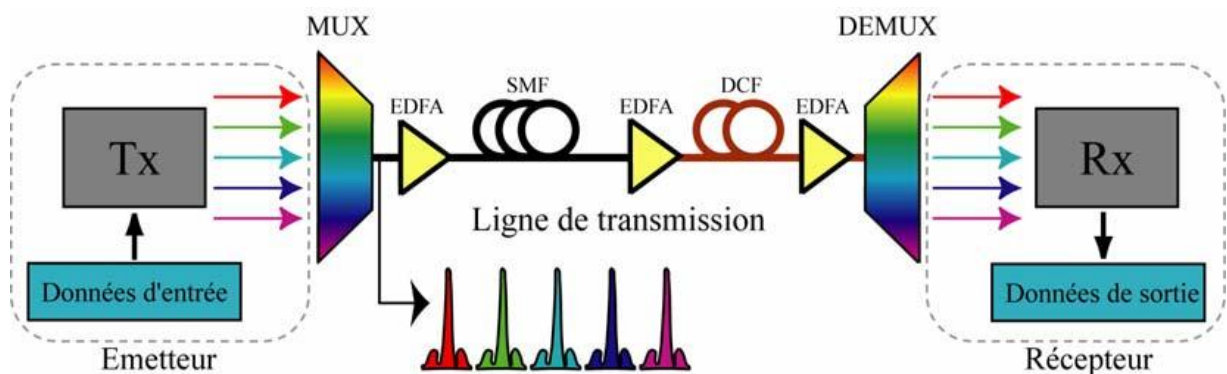


Figure I.1 : Liaison optique point à point [7]

La figure I.1 illustre la configuration typique d'une liaison optique WDM. Dans cette liaison nous pouvons distinguer les trois éléments principaux : l'émetteur, la ligne de transmission et le récepteur. Une diode laser ou LED et un modulateur sont à la base les éléments qui composent l'émetteur, et sa fonction est de transformer les données sous forme électronique en signal optique. Photodiode, amplificateur et filtre sont des éléments de base d'un récepteur transforme les signaux optiques en leur équivalent électronique afin de restituer les données de départ. Pour ce faire, des sous-systèmes de traitement du signal et de synchronisation sont nécessaires. [7]

Pour augmenter la taille et le nombre de signaux transmis dans les fibres optiques et le débit d'information on utilise des techniques de multiplexage, Ces techniques consistent à multiplexer plusieurs porteuses optiques ont des longueurs d'ondes différentes, et de les transmettre ensuite sur une même fibre.

Il y a plusieurs types de multiplexage, les plus importants sont : Le multiplexage temporel (TDM: Time Division Multiplexing), Le multiplexage en longueur d'onde (WDM: Wavelength Division Multiplexing). [7]

La fibre est le siège de phénomènes particuliers linéaires et non-linéaires qui induisent des distorsions sur les signaux qu'on transmet. En effet, de point de vue linéaire, la fibre optique est un guide d'onde diélectrique dispersif qui atténue et déforme les signaux. Afin de préserver l'information transmise, des amplificateurs optiques EDFA et des modules de compensation à base de fibres spéciales (Dispersion Compensating Fiber, DCF) sont ajoutés dans la transmission chaque 50 km à 80 km pour surmonter les effets de l'atténuation et compenser la dispersion chromatique. [7]

I.4. Eléments de bases des réseaux optiques

Un réseau est un ensemble d'équipements reliés entre eux, grâce à des lignes physiques (câbles, fibre optique, ...) ou des ondes hertziennes dans le but d'échanger des données selon des règles (protocoles) bien définies. Si le lien est physique (câble, fibre, ...) le réseau est dit fixe ; si le lien est sous forme d'ondes hertziennes, on parle de réseau sans fil. On distingue un réseau d'un autre selon le nombre d'éléments qui le constituent, sa disposition géographique, et le (les) protocole(s) qu'il utilise. Notre travail concerne la transmission par fibres optiques ; c'est la raison pour laquelle nous ne parlerons par la suite que du réseau fixe. Généralement, on distingue trois types de réseau fixe : le réseau local (*LAN, Local Area Network*), le réseau métropolitain (*MAN, Metropolitan Area Network*) et enfin le réseau étendu ou longue distance (*WAN, Wide Area Network*). [1]

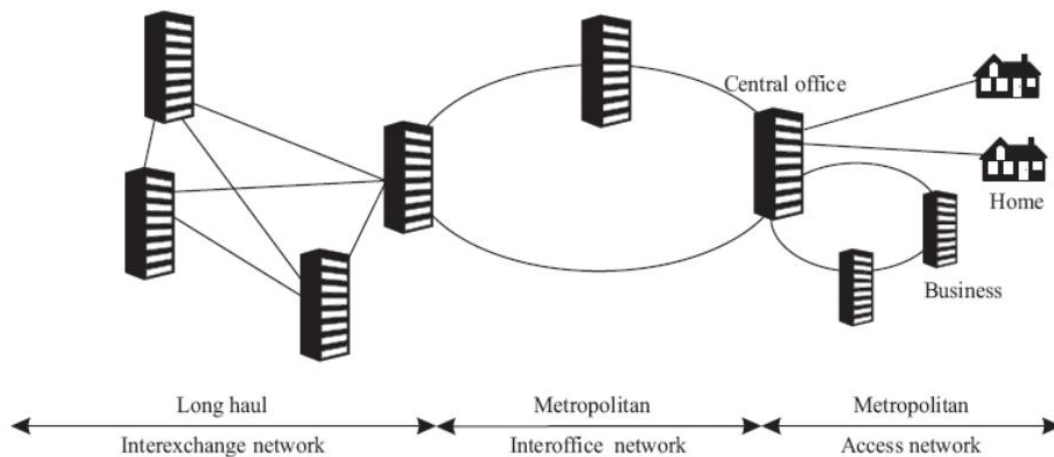


Figure I.2 : Différents types de réseau public [1]

L'optique entre désormais dans les réseaux de desserte grand public, on parle de FTTx (Fiber To The ..., « fibre jusqu'à ... »): quartier (FTTN, pour Neighborhood), au pied d'immeuble (FTTB, pour Building), au domicile (FTTH, pour Home). [1]

Le réseau FTTx peut être point-à-point ou point multipoint, actif ou passif. Les architectures sont dites passives ou actives, selon la présence ou l'absence d'équipements actifs entre le site central de l'opérateur et les points de desserte. [1]

I.5. Fibre optique

Pour bien comprendre les fibres optiques, il faut tout d'abord commencer par comprendre leur structure et composition. Une fibre optique peut être réalisée à l'aide de différents matériaux et ceci impliquera des phénomènes physiques différents observés par la suite.

I.5.1. Structure de la fibre optique

La partie optique de la fibre est constituée d'un cœur, d'indice de réfraction n_c , centré sur l'axe de la fibre et entourée d'une gaine annulaire, d'indice de réfraction n_g inférieur à n_c .

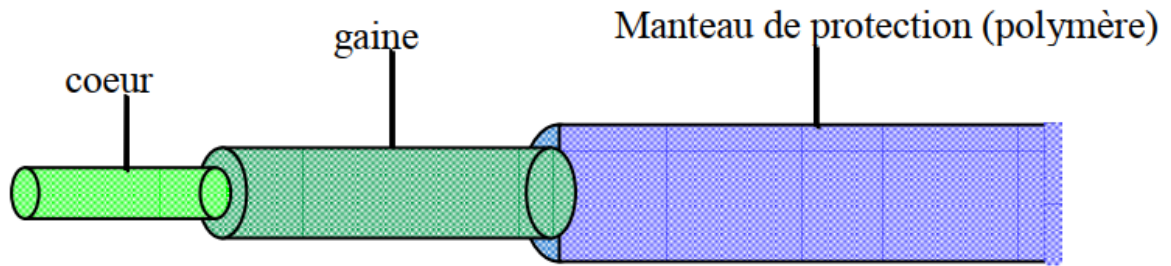


Figure I.3 : Structure d'une fibre optique [4]

➤ **Une couche de protection mécanique en matière plastique:**

En effet, la fibre est protégée par un revêtement de quelques dizaines de micromètres, qui l'isole des agents corrosifs du milieu extérieur et lui confère sa très grande flexibilité. Les matériaux le plus souvent utilisés pour ce revêtement protecteur sont des polymères (polyuréthane...)

➤ **Une gaine optique :** zone où n_g reste constant.

➤ **Un cœur :** au voisinage de l'axe où n_c présente un maximum (le signal lumineux est propagé dans et à proximité du cœur).

I.5.2. Les types de fibres optiques

Selon l'indice on a deux types de fibre optique

➤ **Profil à saut d'indice :** Lorsque l'indice de réfraction du cœur est constant, on parle de profil à saut d'indice.

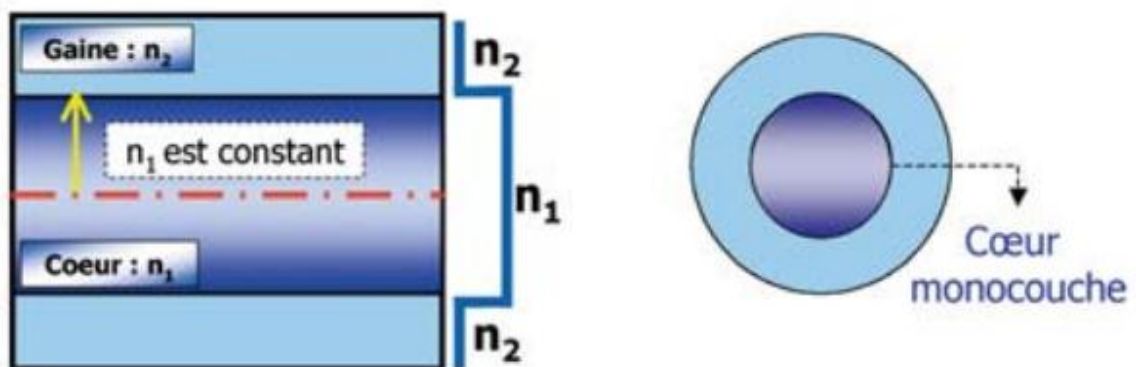


Figure I.4 : fibre à saut d'indice [2]

- **Profil à gradient d'indice** : la variation d'indice entre les régions de cœur et de gaine est progressive.

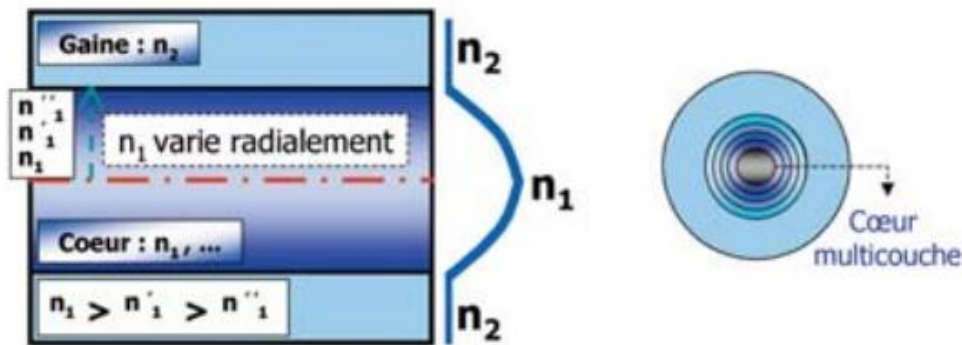


Figure I.5 : fibre a gradient d'indice [2]

Selon le mode de propagation aussi on a deux types de fibre sont :

- ✓ Les fibres optiques multimodes.
- ✓ Les fibres optiques monomodes.

Un mode est un rayon lumineux se propageant au sein du cœur. A certaines longueurs et 850 et 1300 nm) et avec certaines dimensions du cœur (50 et 62,5 μm) plusieurs rayons lumineux traversent la fibre qui porte alors le nom de multimode. À l'inverse, une fibre monomode n'autorise la propagation que d'un seul rayon lumineux. Il porte le nom de mode fondamental. [2]

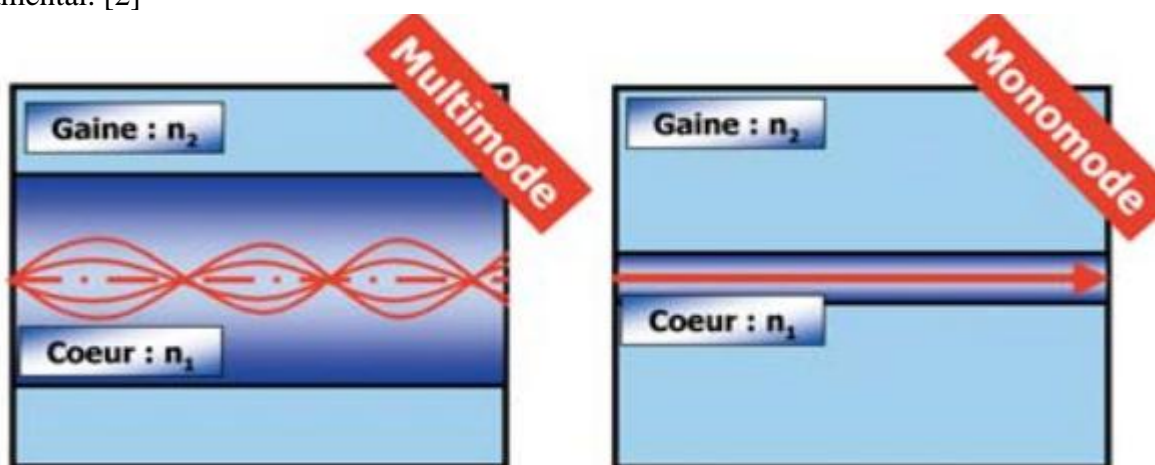


Figure I.6: les types des fibres selon les modes de propagation [2]

I.5.3. Le principe de propagation :

Le guidage du signal optique est basé sur la loi de Descartes. La lumière se propage le long de la fibre par réflexions successives entre le cœur et la gaine. Cela n'est possible que si le cœur et la gaine sont constitués de matériaux transparents et que l'indice de la gaine est inférieur à celui du cœur (une différence de quelques % est suffisante). La seconde condition est d'envoyer le signal lumineux dans la fibre avec un angle, par rapport à l'axe, inférieur à l'ouverture numérique. [4]

L'ouverture numérique (ON) représente l'ouverture angulaire limite avant une transmission et non une réflexion totale sur le dioptré cœur-gaine de la fibre ($ON = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$).

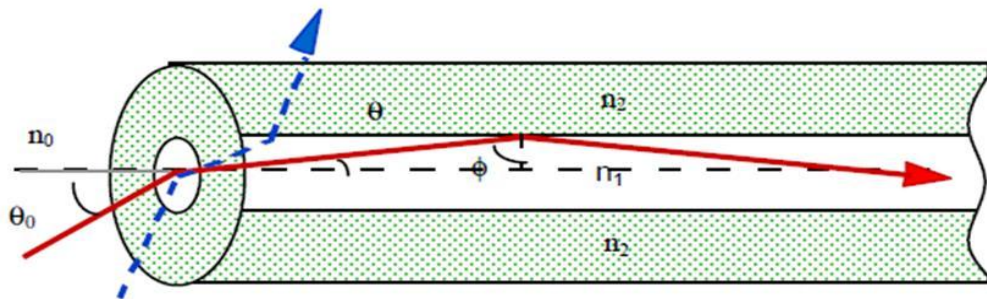


Figure I.7: propagation du signal dans une fibre optique [4]

I.5.4. Caractéristiques de propagation sur fibre optique

Lorsqu'un signal optique se propage à travers une fibre optique, il est affecté par plusieurs distorsions. Ces distorsions sont classées comme linéaires et non-linéaires. Les effets de fibre linéaire comprennent l'atténuation, la dispersion chromatique (CD) et la dispersion du mode de polarisation (PMD). D'autre part, les effets d'oreille non-linéaires incluent l'effet Kerr, la diffusion Raman et la diffusion Brillouin. Ces effets sont discutés brièvement dans les sous-sections suivantes. [4]

I.5.4.1. Les effets linéaires :

Les télécommunications optiques sont toujours confrontées à deux contraintes majeures, qui sont l'atténuation et la dispersion des impulsions optiques

I.5.4.1.1. L'atténuation dans les fibres optiques :

L'atténuation correspond à une diminution de la puissance du signal transmis lors de la propagation dans la fibre optique. Elle s'exprime en décibels (dB). On définit un coefficient d'atténuation α pour une ligne de transmission de longueur L qui s'exprime en dB/Km

$$p_s = p_0 e^{-\alpha l}$$

L'atténuation est un facteur important qui définit la distance de transmission possible entre émetteur et récepteur sans amplificateur.

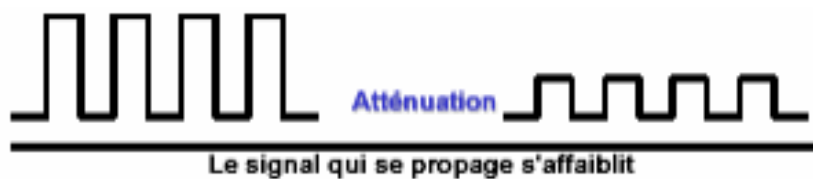


Figure I.8 : Effet de l'atténuation [4]

On peut classer les causes de la perte dans la fibre optique sous deux causes (intrinsèques et extrinsèques), qui sont provient principalement de deux phénomènes : l'absorption et la diffusion de la lumière.[4]

❖ Pertes par absorption :

Ce type de perte se traduit par une conversion de l'énergie des photons en une autre forme d'énergie (vibration par exemple). En effet, la plage de transparence (appelée aussi bande optique) d'un matériau s'étend des bandes d'absorption électronique aux faibles longueurs d'ondes (Band Gap) aux bandes d'absorption de réseau (absorption multiphoton) aux grandes longueurs d'ondes. Ces deux bandes, centrées sur des dipôles électroniques ou atomiques, déterminent le domaine d'utilisation du matériau (200-2000 nm pour la silice).

❖ Pertes par diffusion :

Les pertes par diffusion proviennent de variations microscopiques de la densité du matériau,

de fluctuations de composition et d'inhomogénéité ou de défauts induits durant le processus de fabrication de la fibre. En présence d'un centre diffusant, une onde se propageant subit une diffusion dans toutes les directions.

La figure I.9 illustre les différents mécanismes de pertes due au matériau.

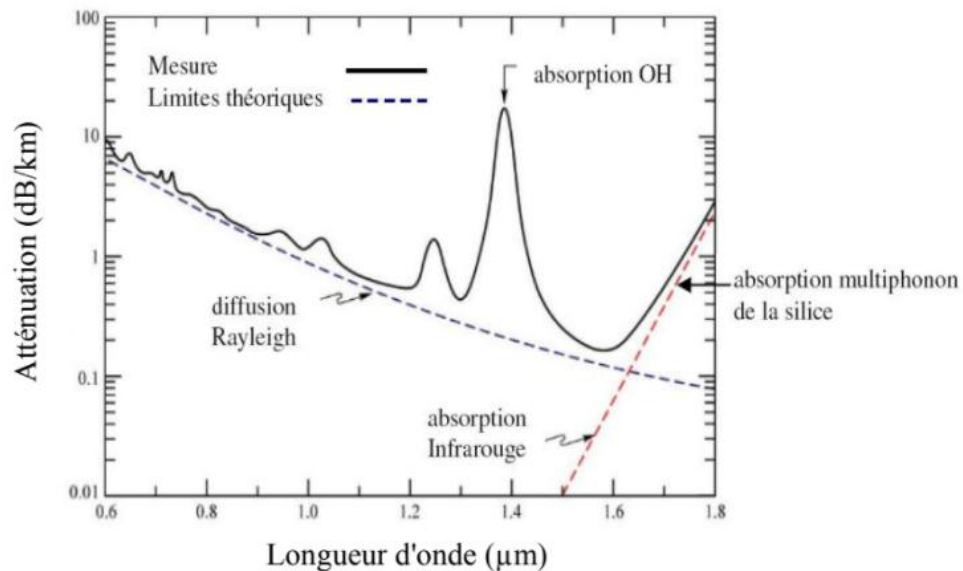


Figure I.9 : les différentes sources d'atténuation dans les fibres de silice.
[11]

I.5.4.1.2. La dispersion

La dispersion est un élargissement temporel des impulsions émises, Les impulsions à la sortie de la fibre sont élargies par rapport aux impulsions à l'entrée. [4]

Cet élargissement a plusieurs causes. Une première cause vient du fait que pour une longueur d'onde donnée (lorsque nous considérons la propagation dans une fibre multimode), les vitesses de groupe des différents modes ne sont pas égales les unes aux autres (on parle de dispersion intermodale). Une seconde cause de la dispersion vient du fait que l'indice de réfraction d'un milieu dépend de la longueur d'onde et que les sources utilisées pour transmettre le signal ne sont pas purement monochromatiques (on parle alors de dispersion intermodale ou chromatique). Les différentes composantes spectrales d'une source ont donc des temps de propagation différents, ce qui provoque l'élargissement d'une impulsion. [1]

La dispersion est donc un facteur majeur de limitation des performances des systèmes de transmission sur fibre à haut débit, leurs effets manifeste en augmentation de taux d'erreur (donc limitation de la Bande Passante) au niveau du récepteur (une diminution de la sensibilité du récepteur) , Si l'élargissement est trop important, il n'est plus possible de décoder correctement l'information à la sortie et une déformation des impulsions et de l'interférence entre symbole (une impossibilité de distinguer les 0 des 1).[4]

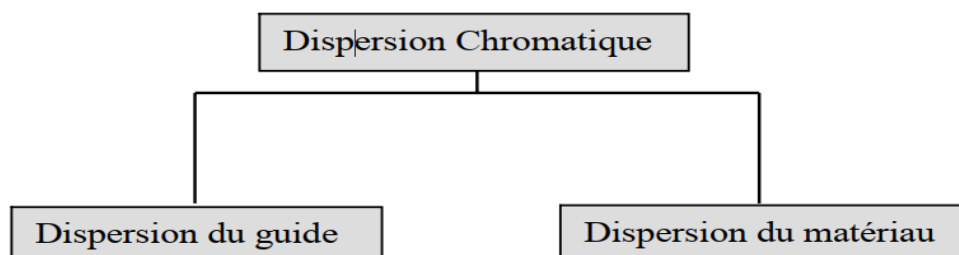
❖ Dispersion du guide d'onde

Ce phénomène est essentiellement dû à la structure géométrique de la fibre, et en particulier aux dimensions réduites du diamètre du cœur (10 à 50 μm). Ce phénomène est particulièrement spécifique aux fibres monomodes, et habituellement négligeable dans la fibre multimodes. En effet, une partie de la puissance optique transportée par le mode fondamental se propage aussi dans la gaine. Les indices de réfraction de la gaine et du cœur étant différents, la lumière se propage donc à des vitesses différentes ($V = \frac{c}{n}$). [8]

❖ Dispersion du matériau

Un matériau, d'indice de réfraction n , est dit dispersif si la vitesse de phase d'une onde plane qui s'y propage varie en mode non-linéaire avec la longueur d'onde. Donc, la dispersion du matériau est causée par la vitesse de la lumière. Par conséquent elle peut être une fonction de la longueur d'onde. [8]

La dispersion du matériau et celle du guide d'onde se combinent ensemble donnant lieu à une dispersion dite dispersion chromatique.



❖ Dispersion chromatique :

Dans les fibres optiques, la vitesse de groupe de la lumière est différente pour différentes composantes de fréquence de l'onde. Par conséquent, le support fibreux est dit dispersif et l'effet est connu sous le nom de dispersion de vitesse de groupe (GVD) ou dispersion chromatique (CD). Par conséquent, une impulsion optique subira un élargissement temporel conduisant à une interférence inter-symbole (ISI) importante. En développant la constante de propagation linéaire β du mode fibre autour de la pulsation porteuse ω_0 dans une série de Taylor. [5].

On écrit

$$\beta(\omega) = \beta_0 + \beta_1(\omega - \omega_0) + \beta_2 \frac{1}{2}(\omega - \omega_0)^2 + \dots$$

Où β_n est la $n^{\text{ème}}$ dérivée de β par rapport à ω . Un paramètre important dans les communications optiques est β_2 [ps^2/km] = $d^2 \beta(\omega)/d\omega^2$ qui est le paramètre GVD de la fibre. Elle était liée au coefficient de dispersion, $D = -(2\pi c \beta_2)/\gamma^2$ [$ps^2/(nm.km)$], où γ et c représentent la longueur d'onde et la vitesse de la lumière. [5]

Différents types de fibres monomodes sont caractérisés en fonction de leur paramètre de dispersion D . La fibre monomode standard (SSMF) a une valeur de dispersion d'environ $17 ps^2/nm.km$ à la longueur d'onde de la fenêtre de perte minimale de $\lambda = 1.55 \mu m$. Les SSMF présentent zéro CD dans la région de longueur d'onde de $1,3 \mu m$. Les fibres à dispersion décalée (DSF) sont un type de fibre optique monomode où leur longueur d'onde à dispersion nulle est passée de $1,3 \mu m$ naturel à $\lambda = 1,5 \mu m$. [5]

❖ Dispersion modale de polarisation (PMD):

Dans le cas d'une fibre optique idéale, il y a une parfaite symétrie pour la section transverse. Dans ce cas, le mode fondamental possède deux polarisations orthogonales (orientations du champ électrique) qui se propagent avec les mêmes caractéristiques : vitesse de phase, vitesse

de groupe ...etc. par contre le non symétrie engendre le phénomène de la PMD.

La PMD peut être causée par certains défauts lors de fabrication et par des contraintes mécaniques qui peut subir la fibre lors de l'installation. Tous ces phénomènes induisent de la biréfringence dans la fibre optique. [4]

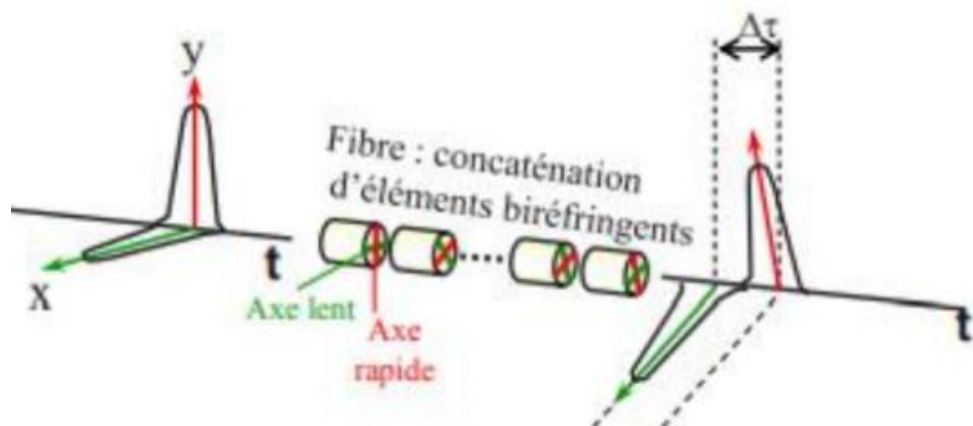


Figure I.10 : Schéma de principe décrivant la dispersion de mode de polarisation. [4]

La PMD est un phénomène statistique lentement variable dans le temps au gré des perturbations mécaniques et thermiques de l'environnement de la fibre. [4]

En raison de la biréfringence de la fibre, les deux modes de polarisation subissent deux constantes de propagation légèrement différentes, β_r et β_l , où les indices r et l désignent respectivement des axes de polarisation rapide et lente. La biréfringence de la fibre, $\Delta\beta(\omega) = \beta_l(\omega) - \beta_r(\omega)$, conduit à un retard différentiel aléatoire, également appelé dispersion modale de polarisation (PMD), entre les deux modes de propagation polarisés orthogonalement. Dans le domaine temporel, la PMD se manifeste sous la forme d'un retard de groupe différentiel (DGD: differential group delay). [5]

$$\tau = (\beta_l - \beta_r)L = \frac{L}{v_g^l} - \frac{L}{v_g^r}$$

Où L est la longueur de transmission de la fibre, et v_g^r, v_g^l sont les différentes vitesses de groupe le long des axes orthogonaux de polarisation optique lent et rapide, respectivement. [5]

La non-linéarité

Nous avons vu que l'indice du matériau varie suivant la fréquence ω . Cet indice varie également en fonction de l'intensité lumineuse. En effet, lorsqu'une onde lumineuse se propage dans un milieu diélectrique, le champ électrique incident induit un déplacement de charges et une polarisation P au sein de ce matériau. Lorsque l'amplitude du champ incident devient importante, la réponse du matériau n'est alors plus simplement proportionnelle au champ initial mais fait intervenir différents harmoniques et sera qualifiée de non-linéaire. En supposant la fibre isotrope et le champ électrique initial E polarisé rectilignement, la polarisation résultant de l'interaction onde-matière peut alors s'exprimer sous la forme d'un développement en série de puissance de E . Cette série est généralement vue comme la somme de deux contributions : un premier terme dit linéaire P_L , car proportionnel au champ incident et un deuxième terme qualifié de non-linéaire P_{NL} , car proportionnel à des ordres supérieurs de E . La polarisation prend finalement la forme suivante [9] :

$$P = P_L + P_{NL} = \epsilon_0 X^{(1)} E + \frac{3}{4} \epsilon_0 X^{(3)} |E|^2 E + \dots$$

La susceptibilité linéaire $X^{(1)}$ représente la contribution dominante à P . Ses effets sont inclus par l'indice de réfraction n et le coefficient d'atténuation α . La susceptibilité de l'ordre 3 $X^{(3)}$ est responsable d'effets non-linéaires tels que la génération de troisième harmonique et la génération de fréquence somme. [9]

Nous pouvons voir clairement que la partie linéaire de la polarisation est responsable de la dépendance de l'indice de réfraction vis-à-vis de la fréquence (phénomène de dispersion chromatique), tandis que la partie non-linéaire engendre une dépendance de l'indice vis-à-vis de $|E|^2$, phénomène connu sous le nom d'effet Kerr optique. [9]

I.5.4.2. Les effets non-linéaires :

L'approximation linéaire d'un canal fibre est valide lorsque la puissance du signal est suffisamment faible. Cependant, pour les systèmes de transmission longue distance et WDM,

La puissance de lancement doit être augmentée de manière significative afin de lutter contre le bruit additif de la chaîne d'amplification optique et de maintenir le rapport signal sur bruit (SNR) à un niveau permettant une détection sans erreur. Au récepteur. Lorsque la puissance du signal augmente, la non-linéarité du canal devient importante et entraîne une dégradation des performances. [5] Les non-linéarités des fibres sont principalement dues à deux origines, l'effet Kerr et les phénomènes de diffusion inélastique tels que la diffusion Raman stimulée (SRS) et la diffusion Brillouin stimulée (SBS). [5]

I.5.4.2.1. L'effet Kerr :

L'effet Kerr en optique géométrique est une extension des lois de réfraction de la lumière lors de la propagation de cette lumière dans des milieux d'indices variables. Dû à la variation de l'indice de réfraction de la silice en fonction de, l'intensité optique de l'onde optique porteuse de l'information. [4]

$$n = n_0 + n_2 \frac{p}{A_{eff}}$$

Où P [W] est la puissance optique instantanée de l'impulsion, A_{eff} [m²] est la surface de cœur effective, tandis que n_0 et n_2 représentent l'indice de réfraction linéaire et non-linéaire de la fibre. [5] Ainsi que la valeur de l'indice non-linéaire n_2 (typiquement de l'ordre de $2.2 \cdot 10^{-20}$ m².W⁻¹ dans une fibre standard aux longueurs d'ondes télécom) est relativement faible, mais le confinement de l'onde est élevé (A_{eff} de l'ordre de 20^{-80} μm²) et les distances d'interaction importantes (de quelques mètres à plusieurs milliers de kilomètres). Les effets de la non-linéarité seront donc loin d'être négligeables. Les fibres optiques sont ainsi devenues l'un des supports privilégiés de l'étude des phénomènes non-linéaire. [9]

L'effet Kerr est toujours significatif en raison de la petite surface effective A_{eff} et de la longue portée de transmission.[5]

Par la suite, nous utiliserons, en particulier dans l'équation de Schrödinger non-linéaire, le coefficient non-linéaire γ qui est relié à n_2 par :

$$\gamma = n_2 \frac{\omega_0}{c A_{eff}}$$

Dans les systèmes WDM, les interactions non -linéaires entre le signal dans le canal d'intérêt et les signaux dans les canaux voisins jouent un rôle important. La non-linéarité intra-canal conduit à l'auto-modulation de phase (SPM) et la non-linéarité inter-canal conduit à la modulation de phase croisée (XPM) et au mélange à quatre ondes (FWM). [5]

L'auto modulation de phase, (SPM, Self Phase Modulation) :

Dans un signal modulé en intensité, la modification de la phase de l'onde proportionnellement à l'intensité de l'onde elle-même est appelée SPM. [1]

La modulation de phase croisée, (XPM, Cross Phase Modulation) :

L'effet XPM intervient quand il y a au moins deux ondes de fréquences différentes qui se propagent simultanément dans la fibre. Par définition, c'est la variation non-linéaire de la phase du champ électrique d'une des ondes sous l'effet du champ électrique de l'autre. [1]

Le mélange à quatre ondes (FWM, Four Wave Mixing) :

la FWM consiste à l'interaction de deux ondes de fréquences distinctes ω_1 et ω_2 produisant deux autres ondes de fréquences ω_3 et ω_4 de sorte que [1]:

$$\omega_3 + \omega_4 = \omega_1 + \omega_2$$

I.5.4.2.2. Les effets de la diffusion stimulée

Ils sont causés par l'interaction paramétrique entre la lumière et les matériaux. Il y a deux types de diffusion stimulée:

❖ **La diffusion Raman stimulée (SRS)**

Ces phénomènes résultent de l'interaction d'un photon avec un phonon optique, c'est-à-dire d'échange d'énergie entre l'onde optique et les vibrations du matériau, lorsque les photons incidents traversent le matériau. [4]

❖ La diffusion Brillouin stimulée (SBS)

Il s'agit d'une agitation thermique qui subisse les molécules constituant le milieu, qui engendre un petit déplacement des molécules de leur position d'équilibre, et par conséquence modification de l'indice de réfraction du milieu, ce phénomène résulte la diffusion de l'onde qui se propageant dans toutes les directions. [4]

I.5.4.2.3. Équation de Schrödinger non-linéaire :

Les degrés de liberté offerts par la géométrie variable de ces fibres ne peuvent être adéquatement exploités que par un outil de conception puissant se basant sur une modélisation précise, assez exhaustive et d'usage aisé. Cette modélisation fait appel généralement à une équation non-linéaire de type "Schrödinger" pour la propagation de l'enveloppe des impulsions. De manière générale, sa forme simplifiée permet une intégration numérique rapide contrairement aux équations de Maxwell. [10]

$$\frac{\partial A}{\partial \ell} = -i \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} + i\gamma |A|^2 A - \frac{\alpha}{2} A + n(t)$$

Où β_2 est le coefficient de dispersion de la vitesse de groupe, γ est le coefficient non-linéaire, α est le coefficient de perte de la fibre, $\ell \in [0, L]$ est la distance de propagation et $n(t)$ est le bruit. Dans la forme indiquée, t est la coordonnée temporelle, dans un cadre de référence qui se déplace avec la vitesse de groupe de l'impulsion. [5]

I.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons décrit brièvement les réseaux optiques et nous avons vu les avantages et le structure d'une fibre optique, nous avons présenté sommairement les principes de base de la propagation de la lumière dans une fibre optique, et le structure d'une liaison par cette fibre Nous avons évoqué les principaux effets limitant le débit de transmission numérique optique. Enfin on a résumé ces effets en l'équation de Schrödinger.

Chapitre II

La transformée de Fourier

non-linéaire

II.1. Introduction

La transformée de Fourier non-linéaire (NFT) ou transformée de diffusion inverse (IST) est une méthode mathématique pour résoudre des problèmes de valeur initiale (IVP) associés à des équations aux dérivées partielles non-linéaires qui appartiennent à une certaine classe d'équations dites intégrables. Il s'agit d'associer une équation non-linéaire donnée à une paire d'opérateurs linéaires auxiliaires, c'est-à-dire qu'une équation aux dérivées partielles non-linéaire peut être écrite comme la condition de compatibilité de deux équations linéaires. En termes simples, une équation non-linéaire intégrable est résolue en passant à un autre domaine, le domaine fréquentiel non-linéaire, où elle est mappée en une équation linéaire. Par conséquent, le NFT peut être considéré comme l'analogue non-linéaire de la transformée de Fourier linéaire (FT), qui, en effet, se rapproche du NFT à faible puissance.

Ce chapitre se concentre sur Système de communication optique cohérent et le modèle Fibre Channel et la théorie de la transformée de Fourier non-linéaire (NFT), la version intégrable du NLSE et sa version normalisée sont présentées qui seront utilisées plus tard pour définir le NFT. Après une brève introduction sur le NFT, la théorie NFT concernant le NLSE avec des conditions aux limites nulles et ses concepts sont passés en revue. Puis met en évidence la similitude entre la NFT et la méthode de Fourier linéaire. Cela peut aider le lecteur à comprendre le NFT.

II.2. Système de communication optique cohérent

Les systèmes de communication à fibre optique modernes utilisent la modulation de l'amplitude et de la phase du champ optique, rendue possible par une détection cohérente, ainsi que des techniques avancées de traitement numérique du signal (DSP) pour atteindre des efficacités spectrales sans précédent. [12]

La flexibilité d'avoir accès au champ complet du signal permet de concevoir différents types de formats de modulation, à partir des formats linéaires conventionnels, comme

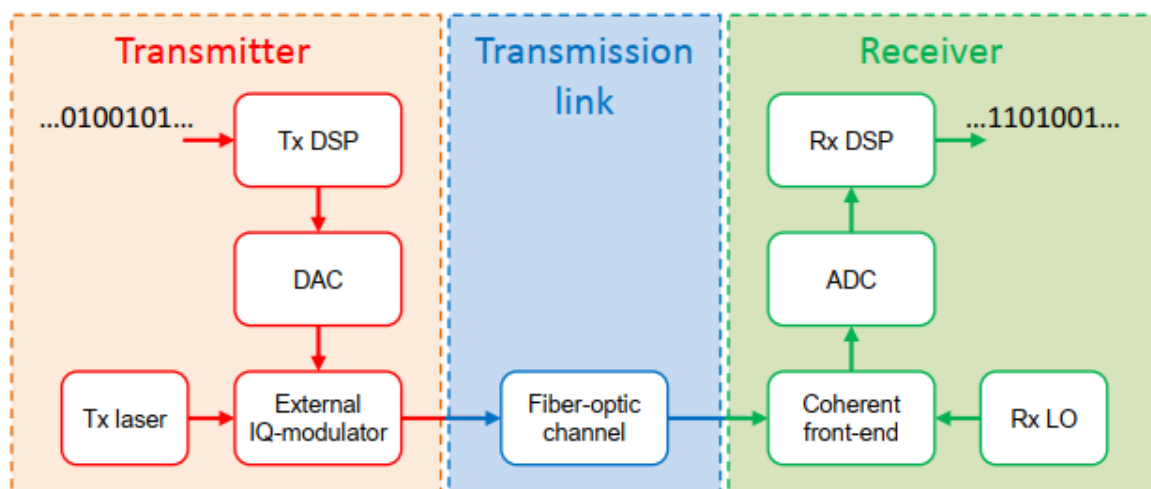


Figure 2.1 : Structure générale d'un système de communication optique cohérent. .
[12]

La modulation par déplacement de phase (PSK) et la modulation d'amplitude en quadrature (QAM), à des formats plus complexes, comme le multiplexage par répartition orthogonale de la fréquence (OFDM), et enfin aux formats basés sur NFT, tels que la synthèse inverse non-linéaire (NIS) et NFDM. [12]

Les principaux composants d'un système générique de transmission optique cohérente, dont le schéma fonctionnel est illustré à la figure 2.1, sont maintenant passés en revue. Au niveau de l'émetteur, les bits de données d'entrée sont traités par une chaîne DSP, La forme d'onde est transmise à un convertisseur numérique-analogique (DAC), qui la convertit du domaine numérique au domaine analogique. Le signal électrique résultant pilote un

modulateur optique qui façonne le champ électrique d'un laser. La modulation des composantes en phase (I) et en quadrature (Q) du signal optique est habituellement effectuée par un modulateur IQ externe utilisant des interféromètres Mach-Zehnder. Le champ optique modulé est transmis via le canal à fibre optique, qui peut être composé de plusieurs tronçons de fibre optique entrelacés avec des amplificateurs optiques (généralement des amplificateurs à fibre dopée à l'erbium (EDFA) ou des amplificateurs Raman). A la sortie de la fibre, le signal reçu est détecté par un récepteur cohérent, qui acquiert à la fois l'amplitude et la phase du signal optique et les traduit linéairement en une forme d'onde électrique. La détection cohérente nécessite un laser supplémentaire qui agit comme un oscillateur local (LO) et qui devrait idéalement être verrouillé en phase et en fréquence sur la porteuse du signal ; dans des cas pratiques, ce n'est pas vrai, et la petite fréquence. [12]

Décalage entre le LO et la porteuse du signal, et leur différence de phase initiale doit être récupérée par le récepteur DSP. Le signal électrique analogique est numérisé par le convertisseur analogique-numérique (CAN), puis traité par la chaîne DSP du récepteur, qui synchronise le signal, atténue les diverses dégradations ajoutées par le canal optique-électrique bruyant, démodule la forme d'onde numérique et décode enfin la trame de données afin de récupérer les bits d'information. La structure d'un système de communication optique cohérent décrit ci-dessus est très générique (pour une description détaillée de celui-ci voir), et il représente le squelette de base de divers systèmes, y compris le système NFDM. Le modèle de canal fibre optique sera présenté dans la section suivante, tandis que les chaînes DSP émetteur et récepteur d'un système NFDM. [12]

II.3. Modèle de canal :

Le principe de la communication NFDM est intimement lié au modèle de canal de fibre donné par le NLSE. En effet, pour transmettre des informations sur le Fibre Channel en évitant l'impact de la non-linéarité, il est nécessaire de générer un signal adapté au NLSE

représentant le canal spécifique du système. [14]

II .3.1 Équation de Schrödinger non-linéaire normalisée :

On a l'équation de Schrödinger

$$\frac{\partial E(\tau, \ell)}{\partial \ell} = -i \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 E(\tau, \ell)}{\partial \tau^2} + i\gamma |E(\tau, \ell)|^2 E(\tau, \ell) \quad (2.1)$$

Afin de supprimer toute dépendance vis-à-vis du canal spécifique, c'est-à-dire la dépendance vis-à-vis des valeurs particulières du GVD et du paramètre non-linéaire, il est courant de travailler avec une version normalisée du NLSE lors de la définition du NFT. Le NLSE normalisé est obtenu à partir de (2.1) en effectuant le changement de variable. [12]

$$q = \frac{E}{\sqrt{P}}, t = \frac{\tau}{T_0}, z = -\frac{\ell}{L} \quad (2.2)$$

Avec $P = |\beta_2|/(\gamma t_0^2)$, $L = 2t_0^2/|\beta_2|$ et T_0 est un paramètre de normalisation libre conduisant à

$$i \frac{\partial q(t, z)}{\partial z} = \pm \frac{\partial^2 q(t, z)}{\partial t^2} + 2|q(t, z)|^2 q(t, z) \quad (2.3)$$

Où z et t représentent les variables spatiales et temporelles normalisées. Les facteurs P , T_0 et L ont des unités physiques de puissance, de temps et de longueur, respectivement, conduisant à l'ensemble sans unité de variables dans (2.2). [13]

Les signes plus et moins devant le terme de dispersion dans (2.3) correspondent aux cas de régimes de dispersion normaux ($\beta_2 > 0$) et anormaux ($\beta_2 < 0$). Dans la suite de cette thèse, seul le régime de dispersion anormale est considéré, puisqu'il correspond au régime de dispersion des SMF standards et le seul supportant les solitons (brillants). Dans ce cas, la NLSE normalisée aboutit finalement à

$$i \frac{\partial q(t, z)}{\partial z} = \frac{\partial^2 q(t, z)}{\partial t^2} + 2|q(t, z)|^2 q(t, z) \quad (2.4)$$

Le NLSE en l'absence de perte et de bruit, Eq. (2.3) appartient à la classe des systèmes non-linéaires intégrables qui peuvent être résolus analytiquement par la NFT. Cela signifie que, étant donné la valeur initiale $q(t, 0)$, la solution $q(t, z) \in L^1(\mathbb{R})$ avec une condition aux

limites nulle, c'est-à-dire $q(t, z) \rightarrow 0$ comme $t \rightarrow \pm\infty$, peut être obtenu via le NFT. En fait, NFT permet une diagonalisation efficace du canal de fibre non-linéaire en décomposant le canal non-linéaire en plusieurs canaux indépendants dans le domaine spectral non-linéaire qui se propagent de manière multiplicative dans le canal non-linéaire.[13]

II.4. Transformée de Fourier non-linéaire :

Le NLSE (2.4) appartient à une classe d'EDP non-linéaires qui peut être résolues exactement, c'est-à-dire qu'il est possible de trouver des solutions analytiques, par une méthode mathématique appelée transformée de diffusion inverse (IST). Ce type d'EDP est dit intégrable. [13]

De même que la méthode de transformée de Fourier linéaire, couramment utilisée pour résoudre les problèmes de valeur initiale (IVP) pour les PDE linéaires, l'IST peut être utilisée pour résoudre les IVP pour les PDE non-linéaires telles que la NLSE. Le parallélisme entre les deux méthodes a conduit certains auteurs à renommer l'IST en NFT, qui est le nom actuellement utilisé dans la communauté des ingénieurs. Le nom NFT est en outre justifié par le fait que dans la limite de très faible puissance du signal $q(t, z)$, on peut prouver que les NFT convergent asymptotiquement vers le Fourier transformer. [5]

II.4.1. La méthode de Fourier pour résoudre des équations aux dérivées partielles linéaires :

La méthode de Fourier est une technique utilisée pour résoudre les EDP linéaires, qui est utile dans les cas où l'équation différentielle considérée prend une forme plus simple dans le domaine de Fourier. [12]

Par exemple, si l'on considère l'IVP pour l'équation d'évolution décrivant la propagation d'un signal dans un milieu linéaire, sans perte et dispersif

$$\frac{\partial q(t,z)}{\partial z} = -\frac{\partial^2 q(t,z)}{\partial t^2}, \quad q(t, z_0) = q_0(t) \quad (2.5)$$

Où $q_0(t)$ est une solution connue à la position z_0 , on a que dans le domaine de Fourier l'IVP prend la forme :

$$\frac{\partial}{\partial z} Q(\omega, z) = i\omega^2 Q(\omega, z), Q(\omega, z_0) = Q_0(\omega) \quad (2.6)$$

Où $Q(\omega, z) = \mathcal{F}\{q(t, z)\}$ est la transformée de Fourier du signal $q(t, z)$, et $Q_0(\omega)$ la transformée de Fourier de la solution connue. En intégrant (2.6) dans l'intervalle $[z_0, z]$ on obtient

$$Q(\omega, z) = \exp(i\omega^2 z) Q(\omega, z_0) \quad (2.7)$$

Qui est l'équation d'évolution spatiale explicite du spectre de Fourier de $q(t, z)$. [12]

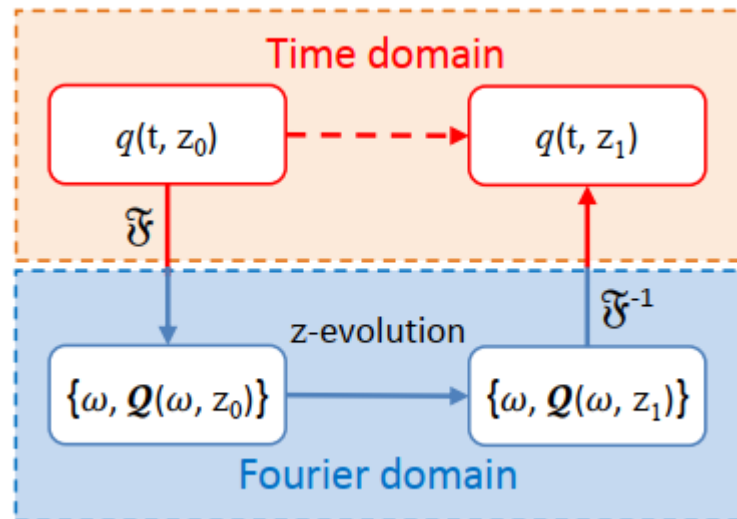


Figure 2.2 : Schéma de la méthode de Fourier pour résoudre l'IVP pour les EDP linéaires. [12]

Pour calculer la solution de (2.5) en un point de l'espace z_1 , lorsqu'une solution est connue au point z_0 , on peut utiliser la procédure suivante

1. calculer la transformée de Fourier $Q(\omega, z_0)$ de $q(t, z_0)$
2. calculer l'évolution de $Q(\omega, z_0)$ de la position z_0 à la position z_1 selon (2.7)
3. calculer la transformée de Fourier inverse de $Q(\omega, z_1)$ pour obtenir la solution $q(t, z_1)$. [5]

Une version modifiée de ces trois étapes constitue la méthode de diffusion inverse pour résoudre un IVP pour le NLSE comme nous allons l'expliquer dans la section suivante. [12].

II.4.2. La méthode de diffusion inverse pour résoudre équations aux dérivées partielles non-linéaires :

La méthode de diffusion inverse est une procédure pour résoudre l'IVP suivant pour le NLSE.

$$i \frac{\partial q(t,z)}{\partial z} = \frac{\partial^2 q(t,z)}{\partial t^2} + 2|q(t,z)|^2 q(t,z) \quad q(t, z_0) = q_0 \quad (2.8)$$

Où q_0 est une enveloppe connue du signal d'intérêt à une position $z = z_0$. Comme pour la méthode de Fourier, la méthode de diffusion inverse nécessite une transformation du domaine temporel vers un domaine spectral, une équation d'évolution du spectre et une transformation inverse. Bien que la méthode pour résoudre le NLSE à l'aide du NFT soit conceptuellement similaire à la méthode de Fourier linéaire présentée dans la section précédente, les deux transformations sont assez différentes. Pour définir le NFT il faut d'abord associer un problème auxiliaire au NLSE, représenté par un couple d'équations. [14]

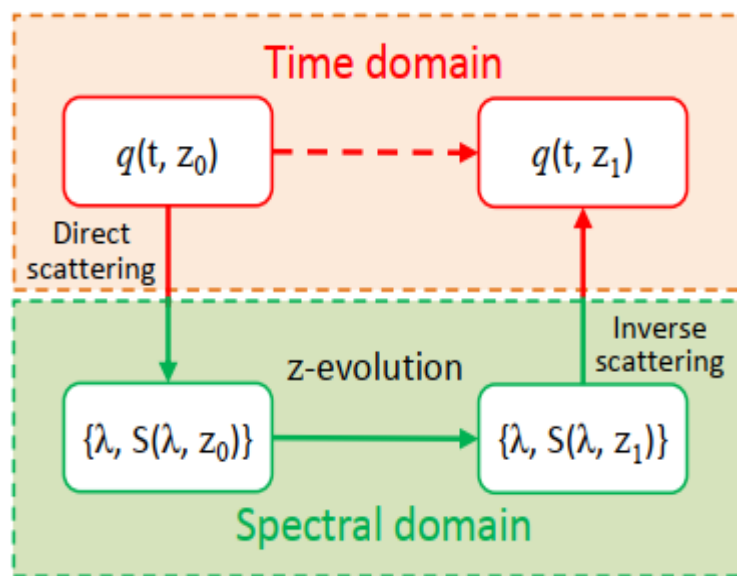


Figure II.3 : Schéma de la méthode de diffusion inverse pour résoudre l'IVP pour le NLSE. [12]

La première équation donne le problème de diffusion ou problème spectral. Dans le cas du NLSE, on l'appelle le problème spectral de Zakharov-Shabat (ZSP) du nom des auteurs qui ont le premier appliqué la méthode de diffusion inverse au NLSE. Le problème de diffusion, qui dépend du signal $q(t, z)$, peut être résolu pour obtenir les données de diffusion. La deuxième équation fournit une équation d'évolution linéaire pour les données de diffusion. Le rapport entre les données de diffusion et le signal peuvent ensuite être utilisés pour reconstruire le signal en un point différent dans l'espace à partir des données de diffusion évoluées. Cette procédure, illustrée à la figure 2.3, est très similaire à celle présentée dans la section précédente. [12]

II.4.3. Problème de diffusion inverse (scattering):

Le problème auxiliaire pour le NLSE est défini, sous la forme Ablowitz-Kaup-Newell-Segur (AKNS), par la paire suivante d'équations différentielles linéaires

$$\frac{\partial v}{\partial t} = P v \quad (2.9a)$$

$$\frac{\partial v}{\partial z} = M v \quad (2.9b)$$

Où v est un vecteur auxiliaire complexe, et les matrices P et M sont appelées la paire Lax.

$$L v = \lambda v \quad (2.10)$$

L est un opérateur linéaire et s'appelle l'opérateur de Lax, et les λ appartiennent au spectre de cet opérateur.

Si nous imposons la condition que λ soit invariant lors de la propagation spatiale $\frac{\partial \lambda}{\partial z} = 0$ la condition de compatibilité $\frac{\partial}{\partial t} \frac{\partial}{\partial z} v = \frac{\partial}{\partial z} \frac{\partial}{\partial t} v$ du système (2.8) peut s'écrire sous une forme appelée condition de courbure nulle

$$\frac{\partial P}{\partial z} - \frac{\partial M}{\partial t} + [P, M] = 0 \quad (2.11)$$

Où $[P, M] = PM - MP$ est le commutateur des deux matrices. Par en choisissant correctement les matrices P et M , nous pouvons faire en sorte que la condition de compatibilité (2.11)

soit exactement la NLSE (après simplification algébrique), reliant ainsi le problème original au problème spectral. Malheureusement, il n'existe pas de méthode analytique pour dériver les matrices et elles doivent être correctement devinées. [12]

II.4.3.1. Transformée de Fourier non-linéaire pour l'équation de Schrödinger non-linéaire :

Pour le NLSE, les matrices P et M ont été trouvées par Zakharov et Shabat et elles sont données par

$$P = \begin{pmatrix} -i\lambda & q \\ -q^* & i\lambda \end{pmatrix}, \quad M = j \begin{pmatrix} -2i\lambda^2 + i|q|^2 & 2\lambda q + i\frac{\partial q}{\partial t} \\ -2\lambda q^* + i\frac{\partial q^*}{\partial t} & 2i\lambda^2 - i|q|^2 \end{pmatrix} \quad (2.12)$$

L'équation (2.9a) est la ZSP et est utilisée pour calculer les données de diffusion, tandis que (2.9b) définit son évolution le long de la coordonnée spatiale, comme (2.7) décrit la propagation du spectre de Fourier de la solution connue $q(t)$. L'opération consistant à trouver les données de diffusion compte tenu du signal $q(t)$ est appelée problème de diffusion directe ou NFT directe, tandis que l'opération inverse est appelée problème de diffusion inverse ou transformée de Fourier non-linéaire inverse (INFT). [12]

II.4.4. Transformée de Fourier non-linéaire directe :

En supposant que le signal $q(t)$ est absolument intégrable, $q(t) \in L^1(\mathbb{R})$, et qu'il satisfait les conditions aux limites d'annulation, c'est-à-dire $|q(t)| \rightarrow 0$ pour $|t| \rightarrow \infty$, un ensemble possible de solutions de (2.12), appelées solutions de Jost, sont

$$\phi^N(t, \lambda) \rightarrow \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} e^{-i\lambda t}, \quad \bar{\phi}^N(t, \lambda) \rightarrow \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} e^{i\lambda t}, \quad t \rightarrow -\infty \quad (2.13a)$$

$$\phi^p(t, \lambda) \rightarrow \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} e^{i\lambda t}, \quad \bar{\phi}^p(t, \lambda) \rightarrow \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} e^{-i\lambda t}, \quad t \rightarrow +\infty \quad (2.13b)$$

Si on calcule le Wronskien, défini comme $W(u, v) = uv - vu$, des deux solutions $\phi^N(t, \lambda)$ et $\bar{\phi}^N(t, \lambda)$ lorsque $t \rightarrow -\infty$ on a

$$W = (\phi^N(t, \lambda), \bar{\phi}^N(t, \lambda)) = 1 \quad (2.14)$$

Et de même pour $\phi^p(t, \lambda)$ et $\bar{\phi}^p(t, \lambda)$ lorsque $t \rightarrow +\infty$ on a

$$W = (\phi^p(t, \lambda), \bar{\phi}^p(t, \lambda)) = -1 \quad (2.15)$$

Nous concluons que les vecteurs de chaque paire sont linéairement indépendants les uns des autres étant donné que leur Wronskien n'est pas identiquement nul. Pour cette raison

$\{(\phi^N(t, \lambda), \bar{\phi}^N(t, \lambda))\}$ et $\{\phi^p(t, \lambda), \bar{\phi}^p(t, \lambda)\}$ forment deux bases linéairement dépendantes pour l'espace propre associé à λ . On peut écrire les solutions $\{(\phi^N(t, \lambda), \bar{\phi}^N(t, \lambda))\}$ comme une combinaison linéaire des vecteurs de base $\{\phi^p(t, \lambda), \bar{\phi}^p(t, \lambda)\}$ comme :

$$\phi^N(t, \lambda) = \phi^p(t, \lambda)b(\lambda) + \bar{\phi}^p(t, \lambda)a(\lambda) \quad (2.16a)$$

$$\bar{\phi}^N(t, \lambda) = \phi^p(t, \lambda)\bar{a}(\lambda) + \bar{\phi}^p(t, \lambda)\bar{b}(\lambda) \quad (2.16b)$$

avec les coefficients $a(\lambda)$, $b(\lambda)$, $\bar{a}(\lambda)$ et $\bar{b}(\lambda)$. Ces coefficients sont appelés coefficients de

diffusion et sont invariants dans le temps. Afin de ne pas surcharger la notation, la dépendance spatiale explicite a été omise. Comme il sera montré dans les sections suivantes, à partir de la connaissance des coefficients de diffusion, il est possible de reconstruire le signal $q(t)$ de manière unique. Plus précisément, seuls les coefficients $a(\lambda)$ et $b(\lambda)$ sont nécessaires étant donné que leur version barrée peut en être dérivée. Le fait que les coefficients de diffusion soient invariants dans le temps, permet de les calculer à un instant arbitraire. Par exemple, en utilisant (2.16a) et les solutions de Jost au bord (2.13), elles peuvent être calculées à $t = +\infty$.

Cet instant, $\phi^p(t, \lambda)$ et $\bar{\phi}^p(t, \lambda)$ sont connus. De plus, il est possible de propager $\phi^N(t, \lambda)$ de $t = -\infty$, où il est connu, à $t = +\infty$ en intégrant (2.9a). Compte tenu de la structure particulière des solutions Jost, il en résulte que les deux premiers coefficients de diffusion sont donnés par :

$$a(\lambda) = \lim_{t \rightarrow +\infty} [\phi_1^N(t, \lambda) \bar{\phi}_1^P(t, \lambda)^{-1}], \quad (2.17a)$$

$$b(\lambda) = \lim_{t \rightarrow +\infty} [\phi_2^N(t, \lambda) \phi_2^P(t, \lambda)^{-1}], \quad (2.17b)$$

Où l'indice indique les composants de la solution Jost. L'utilisation de (2.13) donne :

$$a(\lambda) = \lim_{t \rightarrow \infty} \phi_1^N(t, \lambda) e^{i\lambda t} \quad (2.18a)$$

$$b(\lambda) = \lim_{t \rightarrow \infty} \phi_2^N(t, \lambda) e^{-i\lambda t} \quad (2.18b)$$

Lorsque $\lambda \in \mathbb{R}$ les solutions de Jost sont bornées, de sorte que les équations de projection (2.16) sont bien définies ainsi que les coefficients de diffusion. Les paramètres spectraux $\lambda \in \mathbb{R}$ forment le spectre continu de l'opérateur de Lax et sont souvent appelés fréquences non-linéaires. Quant au contraire λ a une partie imaginaire non nulle, l'une ou l'autre des solutions

de Jost $\{\phi^p(t, \lambda), \bar{\phi}^p(t, \lambda)\}$ diverge lorsque $t \rightarrow +\infty$. Si l'on considère $\lambda \in \mathbb{C}^+$ (demi-plan complexe supérieur), pour s'assurer que $\phi^N(t, \lambda)$ dans (2.16a) n'est pas divergent, on a besoin de la condition $a(\lambda) = 0$. $a(\lambda)$ peut être étendu analytiquement sur le demi-plan complexe supérieur, et ce fait garantit que $a(\lambda)$ a un ensemble fini de zéros qui correspond aux valeurs propres discrètes du problème (2.9a). La condition $a(\lambda) = 0$ définit un spectre discret de N valeurs propres $\{\lambda_i, i = 1, \dots, N\}$ de l'opérateur de Lax. Si λ_i est une valeur propre aussi son conjugué complexe est une valeur propre. Pour cette raison, ne considérer que les valeurs propres dans le demi-plan complexe supérieur fournissent une connaissance complète du spectre de l'opérateur de Lax. Les coefficients de diffusion correspondant aux valeurs propre discrètes peuvent être calculés à partir de (2.16a), qui sous la condition $a(\lambda) = 0$ est bien défini, et ils se traduisent par. [12]

$$a(\lambda_i) = 0 \quad (2.19a)$$

$$b(\lambda_i) = \lim_{t \rightarrow \infty} \phi_2^N(t, \lambda) e^{-i\lambda t} \quad (2.19b)$$

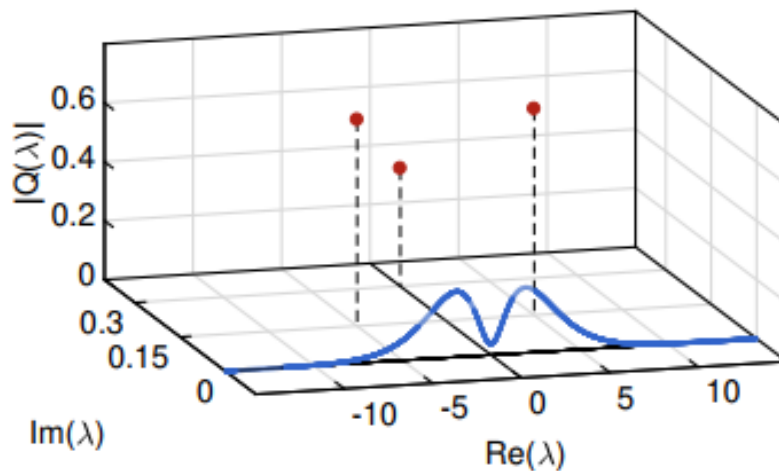


Figure II.4 : Valeur absolue des amplitudes spectrales continue (bleu) et discrète (rouge) correspondant aux fréquences non-linéaires $\lambda \in \mathbb{R}$ et les valeurs propres discrètes $\lambda_i \in \mathbb{C}^+, i = 1, 2, 3, \dots$ [12]

Spectre non-linéaire : Les données de diffusion sont souvent exprimées en termes d'amplitudes spectrales continues (également appelées fonctions spectrales ou coefficients de réflexion) comme suit :

$$Q_c(\lambda) = \frac{b(\lambda)}{a(\lambda)} \quad \lambda \in \mathbb{R} \quad (2.20)$$

Et des amplitudes spectrales discrètes (également appelées constantes de normalisation)

$$Q_d(\lambda_i) = \frac{b(\lambda_i)}{a'(\lambda_i)} \quad \lambda_i \in \mathbb{C}^+, i = 1, \dots, N \quad (2.21)$$

avec $a'(\lambda_i) = \left. \frac{da(\lambda)}{d\lambda} \right|_{\lambda = \lambda_i}$ tel que $a(\lambda_i) = 0 \quad \forall \lambda_i \in \mathbb{C}^+, i = 1, \dots, N$, Les paramètres spectraux continus et discrets λ , ainsi que leurs amplitudes spectrales associées, forment le spectre non-linéaire du signal $q(t, z)$. Le spectre non-linéaire discret du signal est associé aux composantes solitonique non dispersives du signal, tandis que le spectre continu aux ondes dispersives (ou radiatives). Une représentation du spectre non-linéaire composé à la fois de la partie continue et de la partie discrète d'un signal est illustrée à la figure 2.4.

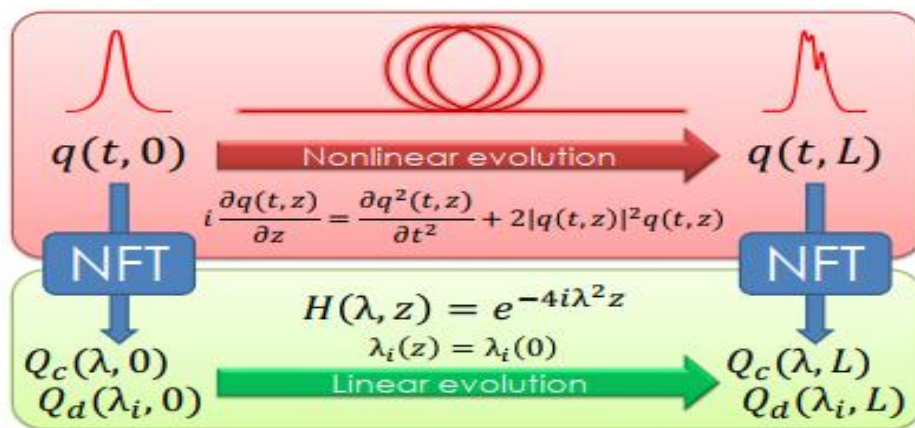


Figure II.5 : Évolution non-linéaire du signal $q(t, z)$ dans le domaine temporel et évolution correspondante du spectre non-linéaire associé dans le domaine non-linéaire. [12]

Dans un sens mathématique plus strict, le terme spectre, composé d'une partie continue et discrète, est l'ensemble de λ qui forment le spectre de l'opérateur de Lax mais dans la littérature NFT récente, le terme pris un sens plus large. Ceci est cependant justifié par le parallélisme avec la transformée de Fourier. En effet, on peut prouver que lorsque la puissance du signal $q(t, z)$ s'approche asymptotiquement de zéro, le spectre continu NFT converge vers le spectre de Fourier linéaire et le spectre discret s'annule. Paramètres spectraux continus λ , celles-ci sont liées aux fréquences de Fourier f par la relation $\lambda = -\pi f$. Dans le contexte des systèmes NFD, il est plus commode de travailler directement avec les coefficients de diffusion $a(\lambda)$ et $b(\lambda)$ donc, dans le reste du manuscrit, nous utilisons le terme spectre non-linéaire dans un sens encore plus large pour désigner aux paramètres spectraux λ et aux données de diffusion associées, qu'il s'agisse soit des amplitudes spectrales, soit des coefficients de diffusion. [12]

Évolution spatiale : L'évolution spatiale des coefficients de diffusion peut être déduite de (2.9b) et se traduit par

$$a(\lambda, z) = a(\lambda, 0) \qquad \bar{a}(\lambda, z) = \bar{a}(\lambda, 0) \qquad (2.22a)$$

$$b(\lambda, z) = b(\lambda, 0)e^{-4i\lambda^2 z} \qquad \bar{b}(\lambda, z) = \bar{b}(\lambda, 0)e^{4i\lambda^2 z} \qquad (2.22b)$$

Le fait que l'évolution spatiale des coefficients de diffusion soit linéaire est une propriété cruciale de la méthode de diffusion inverse car elle révèle la linéarité « cachée » du NLSE. L'équation (2.22) joue le même rôle que (2.6) joue dans la méthode de Fourier linéaire, et elle a une structure similaire. De l'évolution des coefficients de diffusion, nous pouvons également déduire l'évolution spatiale des amplitudes spectrales, qui est donnée par

$$Q_c(\lambda, z) = Q_c(\lambda, 0)e^{-4i\lambda^2 z} \quad \lambda \in \mathbb{R} \quad (2.23a)$$

$$Q_d(\lambda_i, z) = Q_d(\lambda_i, 0)e^{-4i\lambda_i^2 z} \quad \lambda_i \in \mathbb{C}^+, i = 1, \dots, N \quad (2.23b)$$

Pour plus de commodité, nous pouvons définir la fonction de transfert de domaine non-linéaire du canal modélisé par le NLSE comme

$$H(\lambda, z) = e^{-4i\lambda^2 z} \quad (2.24)$$

La figure 2.5 décrit la relation entre le signal dans le domaine temporel et le spectre non-linéaire, et elle montre leurs évolutions respectives dans l'espace. [12]

II.5. Transformée de Fourier non-linéaire inverse :

Le processus inverse, c'est-à-dire la reconstruction du signal de domaine temporel $q(t)$ à partir du spectre non-linéaire, peut être effectué en résolvant l'équation de Gelfand-Levitan Marchenko (GLME) (Ablowitz et al., 2003). [13]

$$K(x, y) - \sigma F^*(x + y) + \sigma \int_x^{+\infty} \int_x^{+\infty} K(x, r) F(r + s) F^*(s + y) ds dr = 0 \quad (2.25)$$

Où la fonction $F(x)$ dépend du spectre non-linéaire et est définie comme

$$F(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \tilde{q}(\lambda) e^{j\lambda x} d\lambda - j \sum_{j=1}^{N_{DS}} C_j e^{j\lambda_j x} \quad (2.26)$$

Lorsque le spectre discret est vide, il se réduit à

$$F(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \tilde{q}(\lambda) e^{j\lambda x} d\lambda \quad (2.27)$$

Qui est juste la transformée de Fourier inverse (IFT) du spectre continu. L'équation intégrale (2.27) est résolue pour trouver $K(x, y)$ et finalement $q(t)$ est déterminé en utilisant $q(t) = -2K(t, t)$. [13]

II.6. Multiplexage par répartition en fréquence non-linéaire NFDM

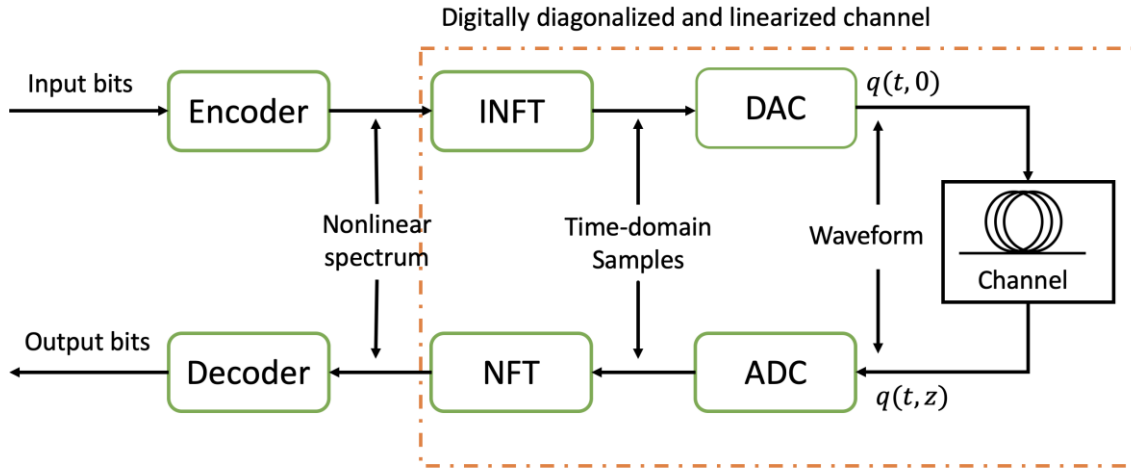


Figure II .6 : Un schéma NFDM typique [13]

Le multiplexage par répartition en fréquence non-linéaire (NFDM) est présenté comme l'analogie non-linéaire du multiplexage par répartition en fréquence orthogonale (OFDM) pour coder (et décoder) les données sur (à partir) du spectre non-linéaire du signal optique, se propageant de manière multiplicative sur la fibre. Dans ce schéma, le modèle de canal idéal est donné par :

$$\hat{q}(\lambda, z) = H(\lambda) \hat{q}_0(\lambda) \quad (2.28. a)$$

$$C_j(z) = H(\lambda_j) C_j(0) \quad (2.28. b)$$

Où $\hat{q}_0(\lambda)$ et $C_j(0)$ sont respectivement un spectre continu et discret à l'entrée du canal. $\hat{q}(\lambda, z)$ et $C_j(z)$ sont les spectres non-linéaires du signal en sortie de canal et le filtre de canal est $H(\lambda) = e^{-4j\lambda^2 z}$. [13]

La figure II.6 montre le schéma fonctionnel d'un système NFDM. Au niveau de l'émetteur, les données sont modulées dans le domaine fréquentiel non-linéaire, selon une constellation spécifique, sur le domaine non-linéaire Spectres $\hat{q}_0(\lambda)$, $C_j(0)$. Ensuite, le signal de domaine

temporel est généré en exécutant la commande INFT comme

$$q(t, z) = \text{INFT} \left(\hat{q}_0(\lambda) C_j(0) \right) \quad (2.29)$$

Et est transmis par le canal fibre. Il existe plusieurs algorithmes introduits pour calculer l'INFT. Au niveau du récepteur, le NFT est appliqué

$$\left(\hat{q}(\lambda, z), C_j(z) \right) = \text{NFT}(q(t, z)) \quad (2.30)$$

Après la compensation du canal (c'est-à-dire la suppression de la rotation de phase,) les spectres sont comparés aux spectres d'entrée à l'aide d'une métrique. Alors que le signal dans le domaine temporel et son spectre linéaire sont déformés en raison de l'interaction entre la dispersion et la non-linéarité de la fibre, le spectre non-linéaire évolue de manière multiplicative le long de fibre sans interaction avec autres composants spectraux. [13]

II.7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons passé en revue la théorie NFT relative aux conditions NLSE et mis en évidence ses concepts qui sont importants pour leur application à la communication. NFT fournit des degrés de liberté sans interaction pour coder les données dans un signal dans le canal fibre non-linéaire. Le schéma NFDM qui utilise le NFT pour maîtriser la non-linéarité de la fibre est introduit.

Chapitre III

Simulation de la transmission
des données sur fibre optique
via la transformée de Fourier
non-linéaire

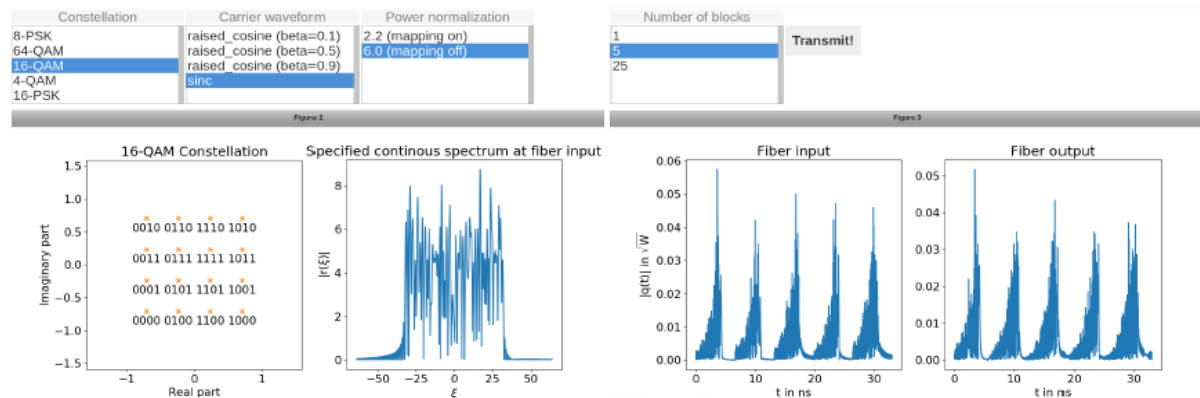
III.1. Introduction

La transmission par fibre optique basée sur le multiplexage par répartition en fréquence non-linéaire (NFDM) a reçu beaucoup d'attention ces dernières années. Nous présentons NFDMLAB, un logiciel open source pour simuler les transmissions NFDM développé par le langage Python. On va simuler cette transmission sous le système d'exploitation linux Ubuntu 21.04. Ce chapitre contient description de NFDMLab et simulation de cette transmission.

III.2. Description de NFDMLAB

La démonstration introduira un environnement de simulation open source hautement reconfigurable pour les systèmes NFDM appelé NFDMLAB qui peut être contrôlé à l'aide d'un environnement graphique simple et intuitif basé sur la célèbre technologie d'ordinateur portable Jupyter. La simulation permet aux utilisateurs de choisir différents formats de constellation, techniques de modulation, formes de porteuse et modèles de fibre et d'amplificateur de manière interactive. Il fournit des visualisations pour l'ensemble de la chaîne d'émetteur-récepteur et fournit des mesures de qualité standard telle que le taux d'erreur sur les bits non codés. [16]

Notre environnement logiciel open source NFDMLAB permet d'étudier de nombreuses variantes différentes de NFDM de manière simple et intuitive, même s'il n'y a aucune expérience préalable avec NFDM ; puisque NFDMLAB est open source, les ingénieurs peuvent l'utiliser comme point de départ pour leurs propres investigations. [16]



(a) : Paramètres de constellation et de modulation

(b) : transmission par fibre optique

Figure III.1 : Captures d'écran tirées d'un notebook NFDMLAB Jupyter [16]

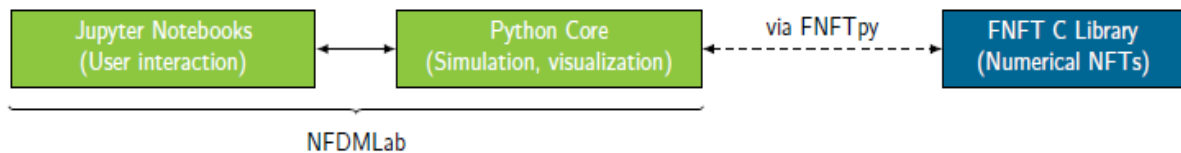


Figure III.2 : Vue d'ensemble des composants de NFDMLAB. [16]

La structure de NFDMLab est illustrée à la Fig. III 2. Le cœur de NFDMLab est écrit en Python, un langage de programmation très populaire et simple à apprendre. Le noyau réalise toutes les tâches de simulation et de visualisation, en utilisant des bibliothèques standard. Il est organisé en modules, dont chacun fournit une fonctionnalité typique d'un système de transmission à fibre optique. Un flux de travail de simulation typique est illustré à la Fig.III 3, où les cases de couleur cyan indiquent les modules individuels. La nouveauté réside dans les modules de (dé)modulation NFDMLab, qui mappent des blocs de symboles tirés d'une constellation vers des formes d'onde de durée finie $q(t)$ à l'aide de techniques NFDMLab, et vice versa. NFDMLab est, à notre connaissance, le premier progiciel accessible au public qui offre une telle fonctionnalité. Les modules (dé-)modulateurs NFDMLab utilisent la bibliothèque logicielle C.[2]

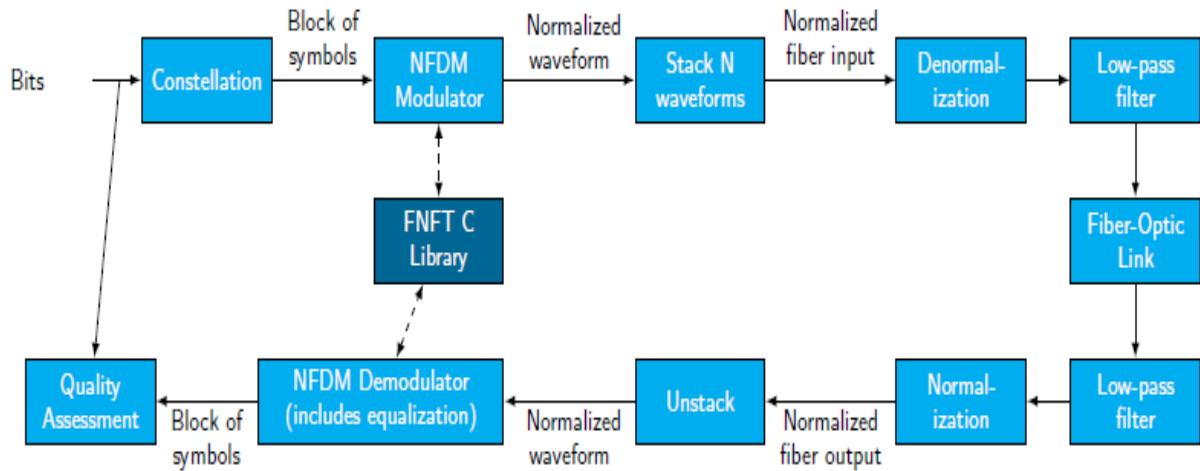


Figure III.3 : Représentation schématique du noyau Python. Les flèches indiquent un flux de travail typique. [16]

FNFT pour calculer les NFT (inverses), qui est interfacé à l'aide du wrapper Python FNFTpy la liaison fibre optique est capable de smuler une amplification EDFA(avec gain plat et éventuellement avec bruit) et amplification Raman (sans bruit) dans les liaisons fibre monomode multi-portées. La propagation non-linéaire au sein du lien est simulée avec un port pythonisé et légèrement modifié de SSPROP. L'amplification Raman est simulée de manière simpliste en utilisant un gain prédéfini dépendant de z . Des approches plus avancées comme ne font pas partie de NFDMLab, mais peuvent être intégrées grâce à la structure modulaire de NFDMLabs. Les modules de (d)normalisation prennent en charge la moyenne des chemins techniques dont il a été démontré qu'elles amélioreraient les performances des schémas de transmission basés sur NFDML dans le module d'évaluation de la qualité fournit des mesures de qualité standard telle que des diagrammes de constellation ou des taux d'erreur sur les bits (non codés). [16]

III.3. Démonstration expérimental du système de transmission optique basé sur NFDM

Cet exemple recrée vaguement l'expérience présentée dans l'article "Transmission of Waveforms Determined by 7 Eigenvalues with PSK-Modulated Spectral Amplitudes" de H. Buelow, V. Aref et W. Idle présenté à la 42nd European Conference on Optical Communication (ECOC 2016). Nous présentons la conception d'impulsions avec un nombre élevé de 7 valeurs propres et une modulation QPSK des amplitudes spectrales. [1]

III.3.1. Conception de signaux NFDM

Notre objectif était de concevoir un ensemble de valeurs propres finies (porteuses), où les bits d'information sont modulés sur des amplitudes spectrales, indépendamment, à condition que les conditions suivantes soient remplies [15] :

- (i) La distance entre les valeurs propres est suffisamment grande pour une détection fiable dans Rx en présence de bruit ASE et la limitation numérique des algorithmes NFT actuels.
- (ii) La plus grande largeur d'impulsion (durée) de toutes les impulsions devient minimale (taux de transmission le plus élevé)
- (iii) La plus grande bande passante (BW) de toutes les impulsions devient minimale en Tx et Rx (efficacité spectrale la plus élevée)
- (iv) Aucune interférence inter-symbole (ISI) entre les impulsions adjacentes pendant la transmission
- (v) Le rapport de puissance médiane (PAPR) reste dans une plage pratique.

On ne sait pas encore tout à fait comment satisfaire toutes ces contraintes en général, alors que ces conditions sont fortement couplées. Nous assouplissons la condition (iii) à une limite BW donnée. [15]

Nous limitons le BW en Tx à 12,5 GHz et le BW en Rx à 20 GHz en supposant que la longueur de la liaison fibre est inférieure à 2000 km, y compris une certaine marge BW pour une génération et une détection plus précises des formes d'onde. Nous définissons BW

(largeur d'impulsion, respectivement) comme l'intervalle de fréquence (temps) contenant 99 % de l'énergie des impulsions. [15]

Nous choisissons un ensemble de 7 valeurs propres comme indiqué dans le tableau 1. L'amplitude spectrale de chaque valeur propre à une constellation QPSK. Ainsi, on module ou plus 14 bits d'information par impulsion. La distance entre valeurs propres est choisie pour remplir les conditions (i), (ii) et (iii) ; d'une part, une grande différence dans les parties imaginaires peut conduire à une grande largeur d'impulsion et une grande différence dans les parties réelles conduit à un grand BW. D'autre part, une petite distance entre deux valeurs propres peut également augmenter à la fois la largeur d'impulsion et BW. [15]

λ_i	$0.45j-0.6$	$0.3j-0.4$	$0.45j-0.2$	$0.3j$	$0.45j+0.2$	$0.3j+0.4$	$0.45j+0.6$
$\ln(q_d(\lambda_i))$	11.85	7.06	7.69	3.81	1.93	-0.62	-5.43

Tableau 1: l'ensemble de 7 valeurs propres du spectre discret des formes d'onde [15]

Comme les valeurs propres ont des parties réelles différentes, l'impulsion sera élargie ou contractée lors de la propagation. Pour éviter l'ISI (condition (iv)), nous posons $|q_d(\lambda_i)| = A_d(\lambda_i | \exp(2j\lambda_i\tau_0 \times \text{real}\{\lambda_i\})|$. En choisissant un positif τ_0 , les impulsions seront d'abord contractées puis éventuellement élargies à la même largeur d'impulsion et au-delà. La longueur du lien pour atteindre la même largeur d'impulsion, L_{\max} , dépend de τ_0 . Nous optimisons $A_d(\lambda_i)$ et τ_0 pour avoir la largeur d'impulsion 14π (pour l'équation de Schrödinger non-linéaire standard) qui se réduit à 2 ns dans notre configuration de transmission (7 Gbit/s).[15]

III.3.2. Système à simuler:

Comme illustré sur la Fig.III.4, pour une évaluation expérimentale, nous avons sélectionné au hasard 256 formes d'onde 2 ns différentes hors ligne, téléchargé ces séquences 512 ns dans un convertisseur numérique-analogique (DAC) 88-GSa/s pilotant un modulateur

Mach-Zehnder IQ. Ce signal a été lancé dans une configuration de boucle de fibre NZ DSF avec une longueur de portée de 24 km et une amplification localisée par EDFA. Avec cette courte longueur de fibre, nous n'avons qu'une petite pénalité en raison de l'inadéquation entre la fibre multi-portée avec perte dans l'expérience et le modèle de fibre sans perte de INFT (transformée de Darboux modifiée) et NFT. Dans les expériences de transmission, nous avons mesuré des puissances de lancement optimales P_{in} d'env. -2,2 dBm, ce qui confirme la valeur moyenne du chemin théorique de -1,53 dBm. Le signal transmis est détecté de manière cohérente et une trace d'environ 2800 symboles 2ns est échantillonnée par un oscilloscope en temps réel avec une bande passante de 80 GSa/s et 33 GHz. Les meilleurs résultats ont été obtenus si la polarisation était ajustée dans le domaine optique par un contrôleur de polarisation ajusté manuellement (PolCon sur la Fig. III.4). [15]

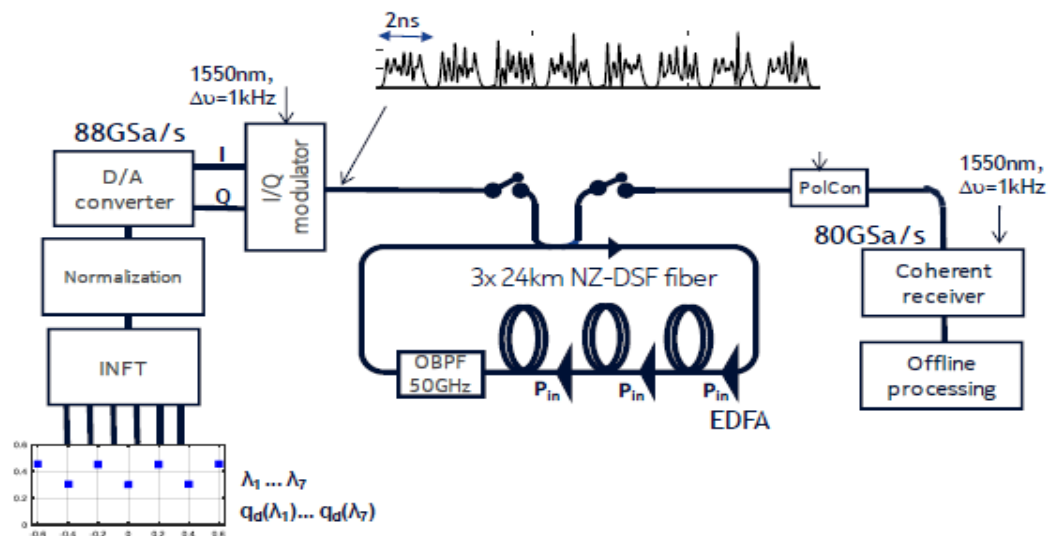


Figure III.4 : Configuration de transmission en laboratoire avec boucle de fibre composée de 3 portées NZDSF de 24 km et d'amplificateurs EDFA. Émetteur : DAC 88 GSa/s, récepteur : hybride optique à polarisation simple et oscilloscope à bande passante de 33 GHz.[15]

III.3.3. Les paramètres de simulation :

On va simuler l'exemple de la Transmission de formes d'onde déterminées par 7 valeurs propres que nous avons défini précédemment avec des valeurs sont :

Link length = 1440.0 km, nonlinear length = 49.68112101298071 km,

Span length = 72.0 km, block duration = 2.001571031156897 ns,

Tx Power Level = 1.6544834125189747 dB

Tx signal bandwidth = 16.78353502177896 GHz,

Rx signal bandwidth = 16.383927045069935 GHz,

Simulation bandwidth = 511.4982101875492 GHz,

Gross bit rate = 6.99450570680376 Gbit/s,

Modulation efficiency = 0.42691264966957154 bits/s/Hz,

Bit error ratio (uncoded) = 0.0, error vector magnitude = -12.550011481839169 dB.[15]

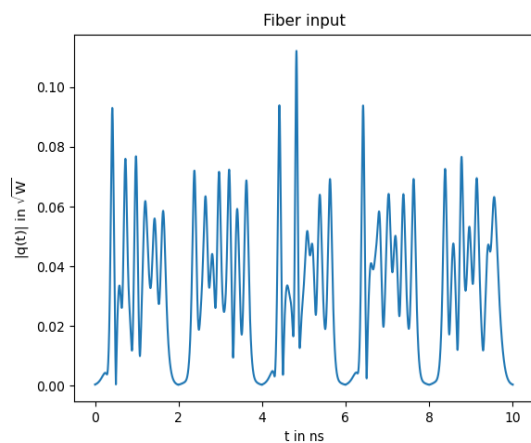
Résultats :

Figure III .5 : signal d'entrée de fibre

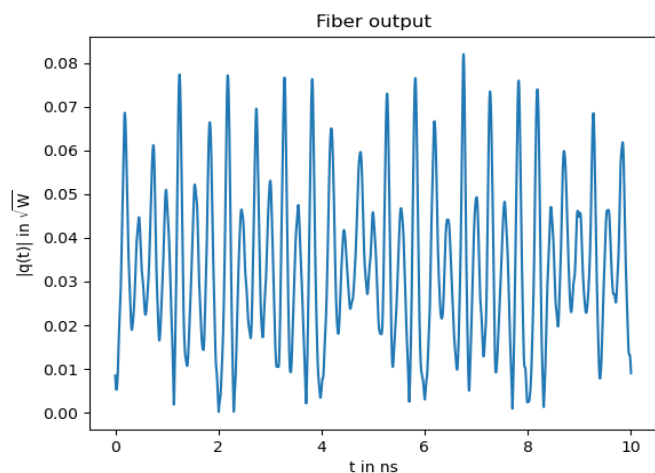


Figure III.6 : signal de sortie de fibre

On remarque qu'au début de la fibre on peut distinguer les impulsions émises entre zéro et un, alors qu'en bout de fibre il est difficile de les distinguer, aussi nous observons de légères déviations aux pics pointus et aux zéros entre les symboles.

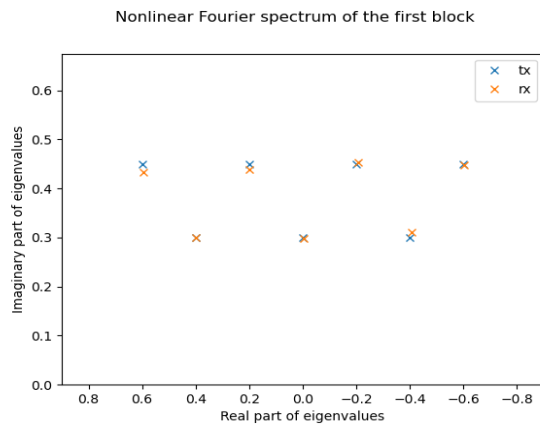


Figure III.7 : spectre de Fourier non-linéaire du premier bloc

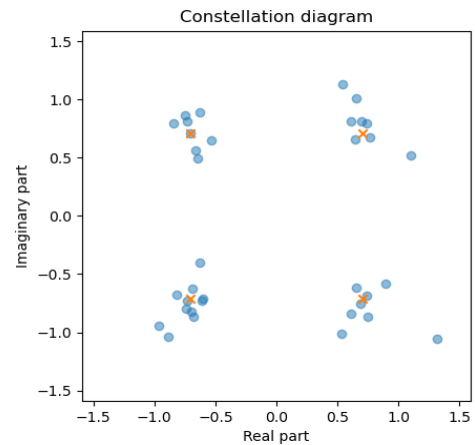


Figure III.8 : diagramme de constellation

On observe de légères déviations aux positions des porteuses émettrices et les porteuses réceptrices. On note également la clarté du signal dans le récepteur. Cela signifie que les impulsions ont été reçues avec succès.

Nous modifions les paramètres de simulation pour voir les changements de résultats, et l'impact de changement des paramètres physiques et de système sur les résultats.

On va changer un paramètre de système qui est: noise nous le mettons à zéro et voir les résultats :

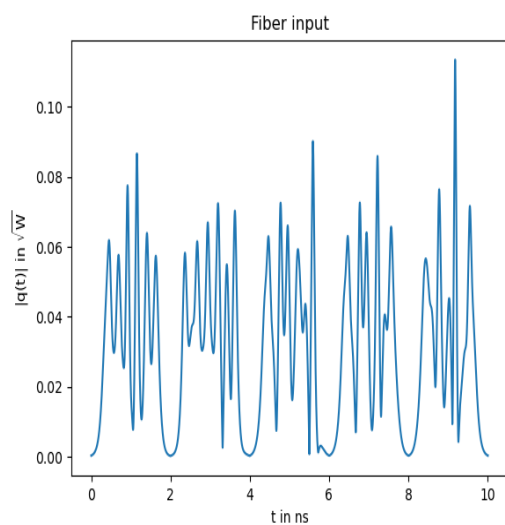


Figure III.9 : signal d'entrée de fibre

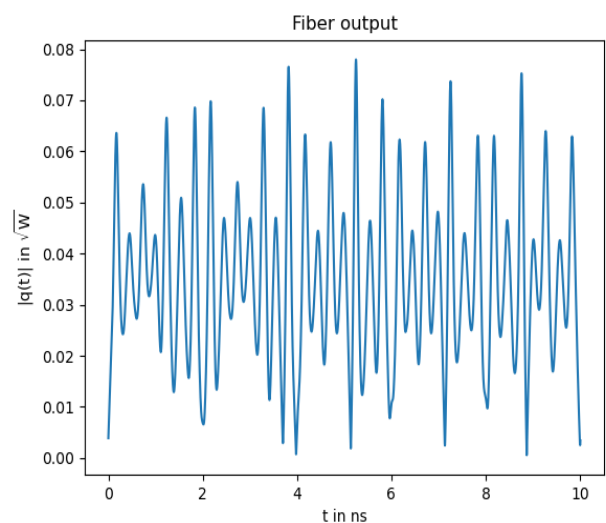


Figure III.10 : signal de sortie de fibre

Malgré l'absence de bruit (noise), on observe la même observation on les premiers résultats avec moins distorsion et déviation.

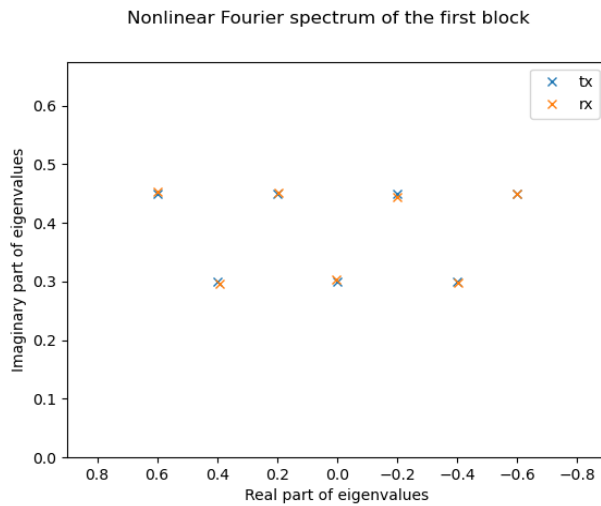


Figure III.11 : spectre de Fourier non-linéaire du premier bloc

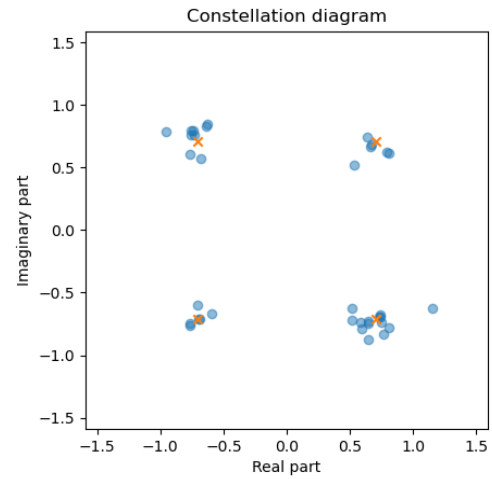


Figure III.12 : diagramme de constellation

On remarque, les déviations aux positions de porteuses émettrices et réceptrices dans ces cas est moins que les premiers résultats (avec bruit).

- Maintenant on va changer un paramètre physique qu'est : effet kerr (γ)
premièrement on le mette à 1,2 et voir les résultats.

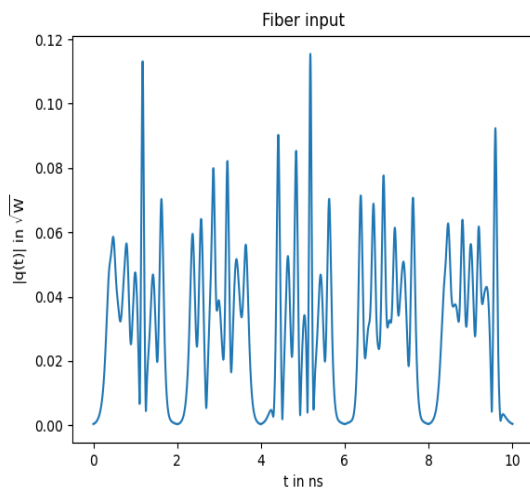


Figure III.13 : signal d'entrée de fibre

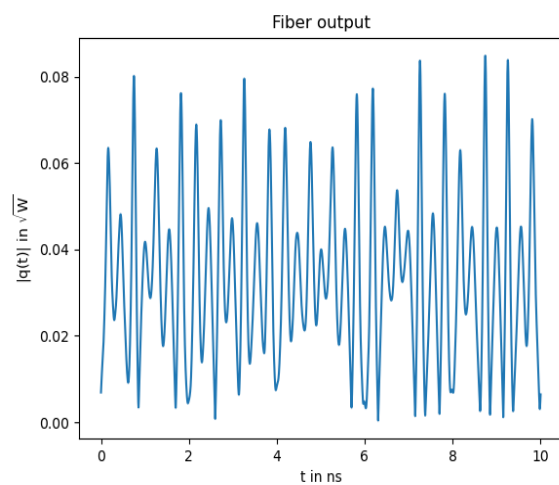


Figure III.14 : signal de sortie de fibre

On remarque que les déviations, les distorsions et la difficulté pour déterminer les Oet les 1 sont moins que le premier résultat et dans le cas de sans bruit (without noise).

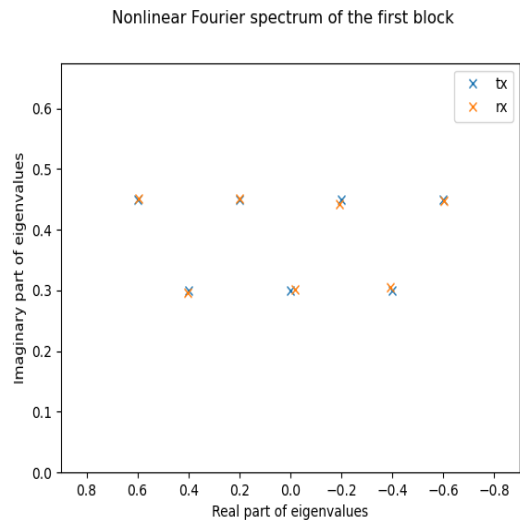


Figure III.15 : spectre de Fourier non-linéaire du premier bloc

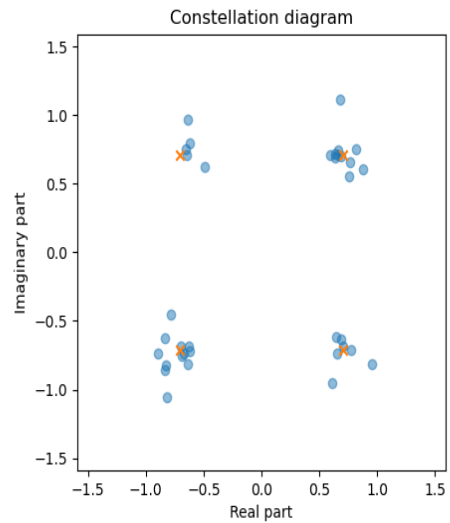


Figure III.16 : diagramme de constellation

On observe qu'il y a accord considérable entre les porteuses émettrices et réceptrices par rapport les autres résultats.

- Si on augmente la valeur de gamma à 2 :

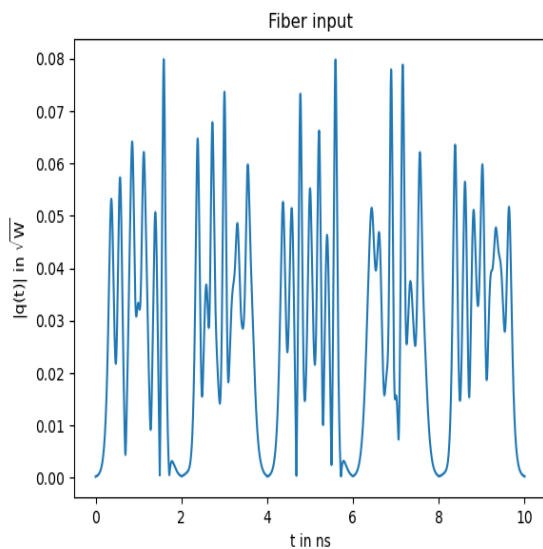


Figure III.17 : signal d'entrée de fibre

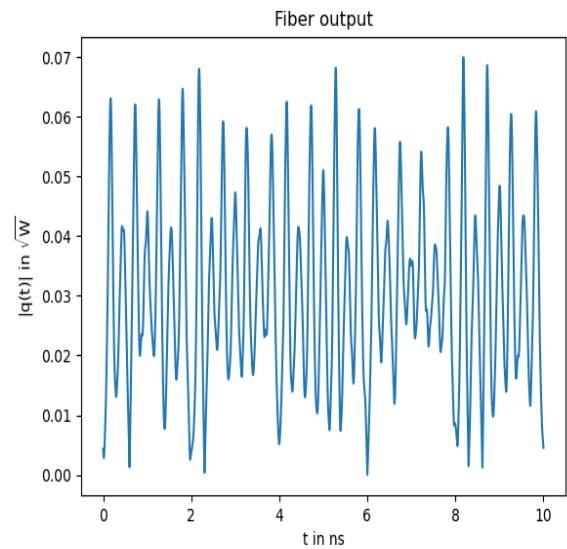


Figure III.18 : signal de sortie de fibre

aussi nous observons que les déviations aux pics pointus et aux zéros sont plus que tous les cas précédents.

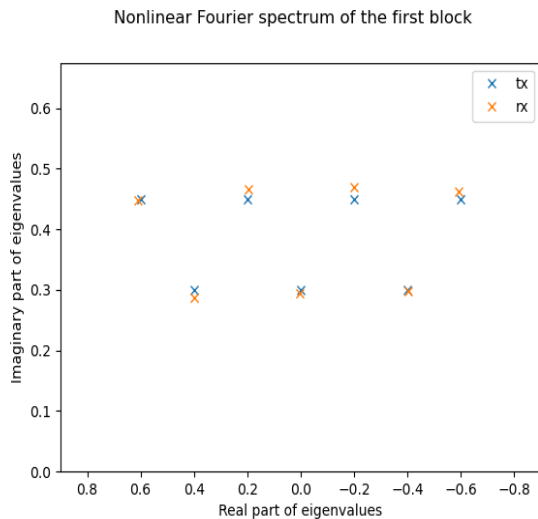


Figure III.19 : spectre de Fourier non-linéaire du premier bloc

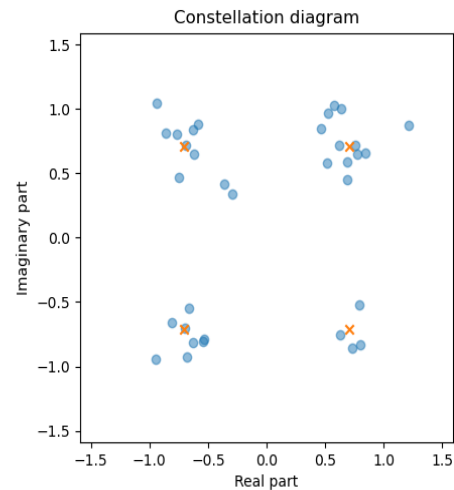


Figure III.20 : diagramme de constellation

On observe plus déviations entre les porteuses émettrices et réceptrices que les autres résultats. On remarque qu'effet kerr (effet non linéaire) a une influence plus que noise (bruit, effet linéaire) dans la transmission des données avec NFDM.

Maintenant on va changer un autre paramètre physique qu'est : longueur de la liaison on le met à 220 km et voir les résultats

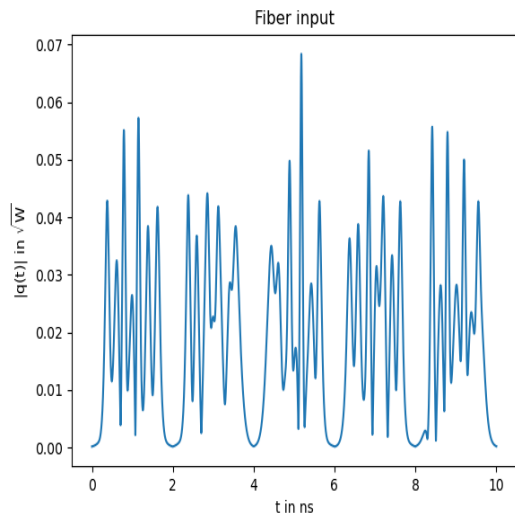


Figure III.21 : signal d'entrée de fibre

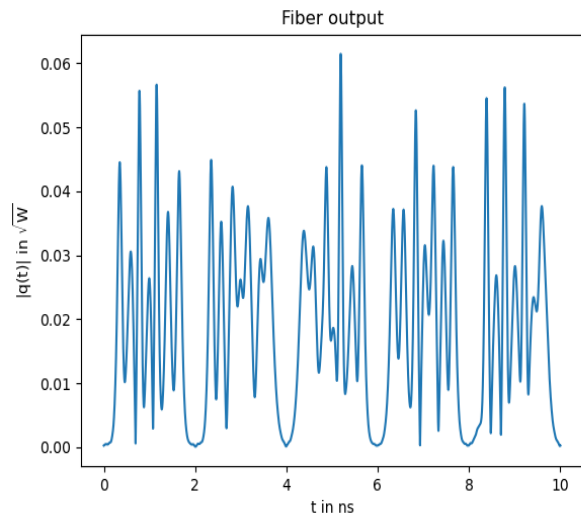


Figure III.22 : signal de sortie de fibre

On remarque que les impulsions émises au début de la fibre qu'en bout de fibre il est facile de les distinguer, aussi on peut dire que ne y a pas des déviations aux pics pointus et aux zéros entre les symboles.

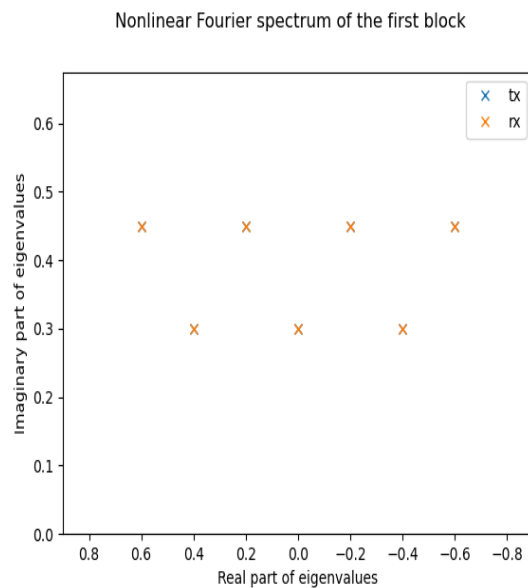


Figure III.23 : spectre de Fourier non-linéaire du premier bloc

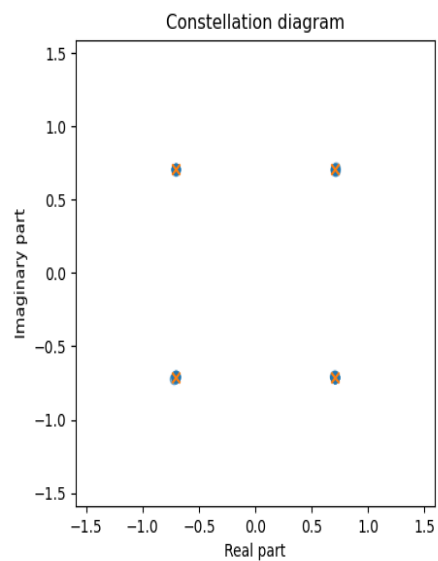


Figure III.24 : diagramme de constellation

On observe que ne y a pas des déviations aux les positions des porteuses émettrices et les porteuses réceptrices. (Accord parfait entre les porteuses). Cet accord retourné au faible

distance donc nous n'avons pas besoin des plusieurs amplificateurs.

- On va faire cette simulation mais sans normalisation et voir les résultats

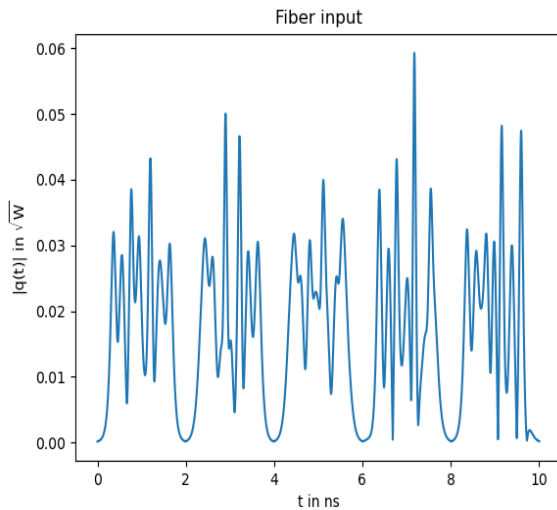


Figure III.25: signal d'entrée de fibre

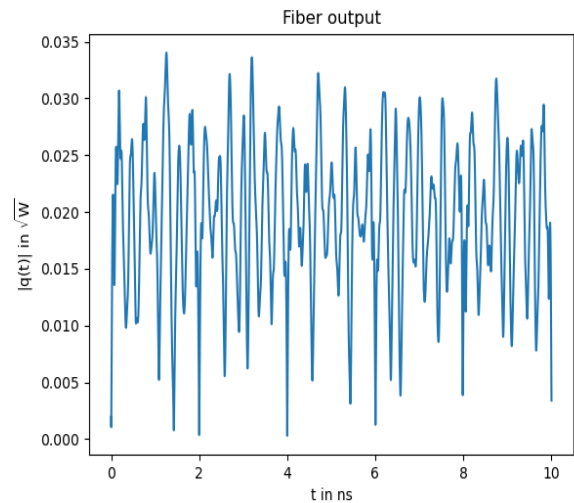


Figure III.26 : signal de sortie de fibre

On remarque que la difficulté à distinguer les impulsions émises entre zéro et un est plus que tous le cas, aussi les déviations aux pics pointus et aux zéros entre les symboles sont plus que tous les cas précédents.

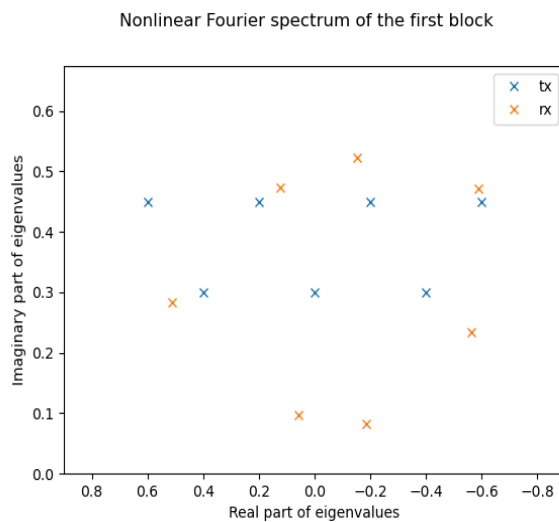


Figure III.27 : spectre de Fourier non-linéaire du premier bloc

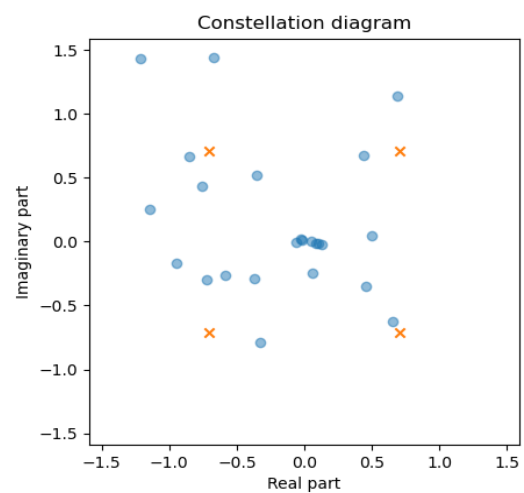


Figure III.28 : diagramme de constellation

On observe des grandes déviations entre les porteuses émettrices et réceptrices au point que ne peut pas distinguer les positions de porteuses émettrices avec leur réceptrice.

Cette déviation et la difficulté à identifier les impulsions et à distinguer entre les zéros et les uns sont dues au Le rapport de puissance médiane (PAPR) ne reste pas dans une plage pratique.

III.4. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté le NFDMLab puis nous avons mis en place une simulation de transmission de formes d'onde déterminées par 7 valeurs propres. Nous avons rempli des conditions pour concevoir ces valeurs propres. Nous avons généré avec succès des formes d'onde longues de 2 ns de 7 solitons de valeurs propres dont les spectres discrets ont été modulés en phase (QPSK). Nous les avons transmis sur jusqu'à 1440 km de fibre NZ DSF en laboratoire. Un faible BER a été obtenu en recherchant la distance euclidienne minimale du signal dans le domaine temporel. Même si le faible BER a confirmé que suffisamment d'informations pour une détection à faible BER sont présentes dans la forme d'onde du symbole reçu, une décision à faible taux d'erreur n'a pas été possible lors du démultiplexage du signal par transformée de Fourier non-linéaire (NFT) et de la décision sur les phases des 7 signaux spectraux discrets. Amplitudes $q_d(\lambda_i)$ séparément. Ces observations confirment que 7 solitons de valeurs propres ont été générés et transmis avec succès, mais elles montrent également que le concept simple de démultiplexage des valeurs propres par traitement NFT dans sa forme actuelle reste difficile pour les valeurs propres modulées QPSK. Puis nous modifions certains paramètres (paramètres physiques et système) et nous voyons les différences de résultats Et nous connaissons l'impact de chacun d'eux sur le processus de transmission. Et nous avons conclu que les effets non-linéaires et les effets de système sont les plus influents sur le fonctionnement du système, tout comme la longueur du lien qui joue également un rôle important dans la transmission.

Conclusion

Générale

Conclusion générale

Ce projet de fin de cycle porte sur l'étude via des simulations numériques de la transmission des données sur fibre optique via la transformée de Fourier non-linéaire.

Nous avons parlé des systèmes de communications optiques en générale et transformer de Fourier non-linéaire et multiplexage par répartition en fréquence non-linéaire (NFDM) en particulier. On sait que les communications optiques à longue distance basées sur la transformée de Fourier non-linéaire ont récemment attiré l'attention en tant que nouvelle stratégie de communication qui embrasse de manière inhérente la nature non-linéaire de la fibre optique. Il faut dire que ces études sont encore récentes. Il est donc difficile de trouver des références et des sources pour ce sujet.

On ne peut pas parler à la transformer de Fourier non-linéaire et la multiplexage par répartition en fréquence non-linéaire (NFDM) sans parler a les effets non-linéaire de fibre optique, lorsque on transmet impulsion a une grande puissance, les champs électromagnétiques intenses qui en résultent sont susceptibles de modifier les propriétés de la silice (matériau dont sont généralement constitués les guides optiques). Ainsi, l'interaction entre une fibre diélectrique monomode et un signal de haute intensité produira automatiquement des phénomènes non-linéaires. Ces non-linéarités vont déformer le signal, et elles vont forcer l'indice de réfraction à s'adapter à une variation. C'est le phénomène connu sous le nom d'effet Kerr optique. Le milieu qui représente ces caractéristiques est alors dit un milieu non-linéaire. Ces phénomènes que nous avons étudiés à la fin du premier chapitre et dans le même chapitre Nous avons vu l'équation de Schrödinger qui contient les effets linéaires et non-linéaires de fibre, et bien sûr généralité sur les fibres optiques

Et puis on a passés à la transformée de Fourier non-linéaire ou au soi-disant théorème de diffusion. Ce qui nous permet de passer à l'autre partie où l'on parle d'exploitation de la

non-linéarité en transmission. Cette technique, communément appelée multiplexage par répartition en fréquence non-linéaire (NFDM), utilise la transformée de Fourier non-linéaire (NFT) pour coder des informations sur le spectre non-linéaire, dont l'évolution le long de la fibre optique, dans certaines circonstances, pour cette raison, NFDM maîtrise la non-linéarité, et devrait augmenter la capacité des réseaux optiques actuels. La première partie de ce chapitre est consacrée au NFT en tant qu'outil de communication optique: le cadre mathématique est introduit et des algorithmes numériques pour le NFT sont développés. Dans une deuxième partie, la mise en œuvre d'un schéma NFDM est décrite et les performances, obtenues par des simulations dans le dernier chapitre, sont présentées. Les résultats sont discutés et certaines limites importantes sont soulignées.

C'est ce dernier qui nous a permis d'exploiter la non-linéarité dans la transmission des impulsions. Dans cette étude, Les 7 solitons de valeurs propres ont été générés et transmis avec succès, mais cela montre également que le concept simple de démultiplexage des valeurs propres par traitement NFT dans sa forme actuelle reste difficile pour les valeurs propres modulées PSK. Nous démontrons la modulation et la détection réussies de signaux NFDM à 7 valeurs propres sur 1440 km sur la base du cadre NFT proposé. Nous pensons qu'il reste encore beaucoup à faire pour élaborer des stratégies de communication pratiques et complètes basées sur la NFT qui intègrent pleinement la non-linéarité de la fibre.

Références bibliographiques

- [1] Nassima BOUDRIOUA, Etude et optimisation d'une chaîne de transmission numérique sur fibre optique : vers une compensation électronique de la PMD, pour obtenir le grade de docteur, de l'Université Paul Verlaine – Metz, Soutenue le 25/10/2007.
- [2] Gunther Mahlke, Peter Gossing, guide pratique du CÂBLAGE FIBRE OPTIQUE POUR RÉSEAUX LOCAUX, Guide pratique à l'usage 2005
- [3]Stella Civelli, Nonlinear frequency-division multiplexing: theoretical aspects, numerical algorithms, and experimental demonstration, Phd Course in Emerging Digital Technologies, Year 2017/2018.
- [4]AYACHI Mammam,SAYAH Abderraouf et TAMER Youcef, Thème Etude Et Simulation D'un Système De Transmission Optique Cohérent, obtenir du diplôme de Master academique, Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued Faculté des Sciences et de la Technologie, Soutenue 2020.
- [5] Wasyhun Asefa Gemechu, Comparison of Nonlinear Frequency Division Multiplexing and OFDM for optical fiber transmissions, Università degli studi (Brescia, Italie).le 1er avril 2019.
- [6]Shiva Kumar and M. Jamal Deen, Fiber optique communication fondamentale AND applications, Université Canada.2014.
- [7]Joaquín Alfonso Alejandro CORNEJO BAUTISTA, ÉTUDE DE LA SÉCURISATION DU CANAL DE TRANSMISSION OPTIQUE PAR LA TECHNIQUE DE BROUILLAGE DE PHASE ET DE CRYPTAGE QUANTIQUE, d'obtenir le Diplôme de DOCTEUR, publié, l'Université de Bretagne Sud, l'ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE DES TÉLÉCOMMUNICATIONS DE BRETAGNE, Soutenue le 19 Novembre 2008.
- [8] BENDRIHEM ABDELAZIZ , Etude des phénomènes liés à la propagation dans les fibres optiques , MEMOIRE Présenté pour l'obtention du diplôme de MAGISTERE EN

ELECTRONIQUE OPTION : Micro-onde , Université de Batna .

[9]Christophe FINOT, Similaritons dans les amplificateurs Raman à fibre optique, présentée pour obtenir le grade de Docteur en Physique, Université de Bourgogne. octobre 2005.

[10] Rim CHERIF, Étude des Effets non Linéaires dans les Fibres à Cristaux Photoniques, En vue d'obtenir le Diplôme de DOCTEUR En Technologies de l'Information et de la Communication. Université du 7 Novembre à Carthage. Avril 2009.

[11]MEDJOURI ABDELKADER, cour communication optique, Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued. 2022.

[12] Gaiarin, S.Nonlinear Fourier transform for dual-polarization optical communication system. DTU -Department of Photonics Engineering.2018.

[13] ELHAM BIDAHI, ANALYSIS AND DESIGN OF NONLINEAR FIBER OPTIC COMMUNICATION SYSTEMS d'obtenir M.A.Sc. Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran. 2020.

[14] Stella Civelli, Nonlinear frequency-division multiplexing: theoretical aspects, numerical algorithms, and experimental demonstration.sant'Anna school of advanced studies-pisa.2019.

[15] Vahid Aref et Wilfried Idler ,Transmission of Waveforms Determined by 7 Eigenvalues with PSK-Modulated Spectral Amplitudes,Nokia bell Labs, Lorenzstr. 10,70435,Stuttgart, Germany,Article May2016.

[16] Brehler, M., Mahnke, C., Chimmalgi, S., & Wahls, S. (2019). NFDMLab: Simulating nonlinear frequency division multiplexing in Python. In Proceedings of the 2019 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC 2019) [M3Z.13] OSA - The Optical Society. <https://doi.org/10.1364/OFC.2019.M3Z.13> .