

Monitoring des effets dynamiques de polarisation dans des liaisons optiques cohérentes à 40 Gbit/s et 100 Gbit/s

par

Niamien Bla Marie Janvier TANOH

MÉMOIRE PRÉSENTÉE À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE  
COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE LA MAÎTRISE  
AVEC MÉMOIRE EN GÉNIE, CONCENTRATION :  
RÉSEAUX DE TÉLÉCOMMUNICATIONS  
M. Sc. A.

MONTRÉAL, LE 29 JUIN 2017

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE  
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

©Tous droits réservés

Cette licence signifie qu'il est interdit de reproduire, d'enregistrer ou de diffuser en tout ou en partie, le présent document. Le lecteur qui désire imprimer ou conserver sur un autre media une partie importante de ce document, doit obligatoirement en demander l'autorisation à l'auteur.

**PRÉSENTATION DU JURY**

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

Mme Christine Tremblay, directrice de mémoire  
Département de génie électrique à l'École de technologie supérieure

M. Mohamed Cheriet, président du jury  
Département de génie logiciel/TI à l'École de technologie supérieure

M. Christian Desrosiers, membre du jury  
Département de génie logiciel/TI à l'École de technologie supérieure

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 2 JUIN 2017

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE



## **REMERCIEMENTS**

En premier, je remercie ma directrice de recherche la Professeure Christine Tremblay pour sa disponibilité, ses conseils avisés, et pour tout ce qu'elle a été conduite de faire tout au long de ce projet et la rédaction de ce mémoire.

En deuxième, je tiens à remercier l'équipe de Ciena, Michel Belanger, Travis Crawford, Michael Reimer et tous ceux qui ont contribué par leur expertise aux travaux de ce projet.

En outre, je souhaite remercier tous les anciens membres de l'équipe du Laboratoire de technologies de réseaux qui m'ont précédé dans ce projet de monitoring et dont les travaux m'ont été d'une grande utilité.

Enfin, je remercie, toute ma famille pour leur soutien et encouragement tout au long de ses années d'étude en maîtrise.



# **MONITORING DES EFFETS DYNAMIQUES DE POLARISATION DANS DES LIAISONS OPTIQUES COHÉRENTES À 40 GBIT/S ET 100 GBIT/S**

Niamien Bla Marie Janvier TANOH

## **RÉSUMÉ**

Les systèmes de transmission à fibre optique cohérents déployés depuis quelques années offrent des capacités par canal de plus en plus élevées (40 Gbit/s et plus). Ces systèmes basés sur le multiplexage en polarisation du signal optique doivent donc être plus robustes aux effets de polarisation afin d'éviter des dégradations de performance qui pourraient conduire à des pannes dans des cas extrêmes.

Dans ce mémoire, une analyse des mesures de performance et d'effets de polarisation réalisées dans deux liaisons optiques cohérentes est présentée. Ces mesures ont été obtenues en effectuant le monitoring d'une liaison aérienne régionale pendant une période de 22 mois et d'une liaison enfouie dans une zone métropolitaine durant 6 mois, à l'aide de transpondeurs cohérents et de polarimètres rapides. Différentes analyses ont été faites à l'aide d'outils de traitement des données développés sous MATLAB.

Dans la première partie du mémoire, une analyse des événements de polarisation excédant 1,27 rad/ms observés dans la liaison aérienne de 1020 km à 40 Gbit/s est présentée. Les mesures ont été effectuées avec un polarimètre à une fréquence d'acquisition de 20 kHz. Une analyse des variations rapides de polarisation dans une liaison enfouie de 240 km à 100 Gbit/s déployée dans une zone métropolitaine est également présentée. Les mesures ont été obtenues à l'aide d'un polarimètre opérant à 24 kHz et 390 kHz.

En deuxième partie, une analyse comparative des effets de polarisation (SOP, PMD, PDL) observés dans les deux liaisons optiques étudiées est effectuée et les résultats sont comparés à des mesures similaires effectuées précédemment dans une liaison optique enfouie de 230 km.

En troisième partie, une étude de l'erreur de suivi de la polarisation par le transpondeur cohérent fait ressortir le lien entre l'erreur de suivi de la polarisation et la bande passante du filtre adaptatif du récepteur cohérent.

**Mots clés :** Effets de polarisation, fluctuations de polarisation, monitoring, transpondeur cohérent, polarimètre.



# **MONITORING OF DYNAMIC POLARIZATION EFFECTS IN COHERENT OPTICAL LINKS AT 40 GB/S AND 100 GB/S**

Niamien Bla Marie Janvier TANOH

## **ABSTRACT**

The coherent fiber optic transmission systems deployed in recent years provide increasingly high per-channel capacities (40 Gb/s and beyond). These systems based on polarization multiplexing of the optical signal must be more robust to polarization effects in order to avoid performance degradations which could lead to failures in extreme cases.

In this thesis, an analysis of the performance and polarization dynamics observed in two coherent optical links is presented. These measurements were obtained by monitoring a regional aerial link over a period of 22 months and a buried link in a metropolitan area over 6 months using coherent transponders and fast polarimeters. Different analyzes were made using data processing tools developed under MATLAB.

In the first part of the thesis, an analysis of polarization events exceeding 1.27 rad/ms observed in a 1020-km aerial link at 40 Gb/s is presented. The measurements were carried out with a polarimeter at an acquisition frequency of 20 kHz. An analysis of the rapid polarization changes in a 240-km buried link at 100 Gb/s deployed in a metropolitan area is also presented. The measurements were obtained using a polarimeter operating at 24 kHz and 390 kHz.

In the second part, a comparative analysis of the polarization effects (SOP, PMD, PDL) observed in the two optical links studied is performed and the results are compared with similar measurements previously performed in a buried optical link of 230 km.

In the third part, a study of the polarization tracking error by the coherent receiver shows the relationship between the tracking filter bandwidth of the coherent receiver and the polarization tracking error.

**Keywords:** Polarization effects, polarization transients, monitoring, coherent transponder, polarimeter.



## TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION .....	1
CHAPITRE 1 MONITORING DE LIAISONS OPTIQUES À HAUT DÉBIT .....	5
1.1 Introduction.....	5
1.2 Monitoring de liaisons optiques.....	5
1.2.1 Objectifs du monitoring de liaisons optiques.....	6
1.2.2 Difficultés et Défis du monitoring de liaisons optiques.....	7
1.2.3 Techniques de monitoring.....	8
1.3 Paramètres de performance d'une liaison optique .....	9
1.3.1 Taux d'erreur binaire (BER).....	9
1.3.2 Rapport signal sur bruit (SNR/OSNR) .....	9
1.3.3 Dispersion chromatique .....	10
1.3.4 Polarisation de la lumière et ses effets .....	10
1.3.4.1 Polarisation de la lumière.....	10
1.3.4.2 Dispersion des modes de polarisation.....	13
1.3.4.3 Ordre de PMD et conséquences .....	14
1.3.4.4 Mesure de la PMD .....	15
1.3.4.5 La perte dépendante de la polarisation.....	17
1.3.5 Fluctuations des états de polarisation .....	18
1.4 Revue des expériences de monitoring de liaisons optiques.....	20
1.4.1 Monitoring avec un polarimètre.....	20
1.4.1.1 Polarimètre .....	20
1.4.1.2 Fonctionnement général d'un polarimètre à détection parallèle.....	21
1.4.1.3 Fonctionnement général d'un polarimètre à détection séquentielle .....	22
1.4.1.4 Revue des expériences de monitoring avec un polarimètre .....	24
1.4.2 Monitoring avec un transpondeur cohérent .....	26
1.4.2.1 Transpondeur cohérent.....	26
1.4.2.2 Architecture du transpondeur cohérent .....	28
1.4.2.3 Estimations des paramètres du signal et algorithme des moindres carrés .....	31
1.4.2.4 Revue des expériences de monitoring avec un transpondeur cohérent.....	33
1.4.3 Revue des expériences de mesures sur les effets transitoires de polarisation.....	34
1.4.3.1 Études théoriques et expérimentales des effets transitoires de polarisation.....	34
1.4.3.2 Étude des effets transitoires de polarisation sur des liaisons commerciales .....	36
1.4.3.3 Quelques chiffres sur les effets transitoires de polarisations .....	39

1.5	Conclusion .....	41
<b>CHAPITRE 2 MONITORING DE DEUX LIAISONS COHÉRENTES AVEC UN POLARIMÈTRE : ANALYSE STATISTIQUE .....</b> 43		
2.1	Introduction.....	43
2.2	Analyse des mesures du polarimètre sur une liaison cohérente 40 Gbit/s.....	43
2.2.1	Présentation de la liaison aérienne à 40Gbit/s .....	43
2.2.2	Présentation du polarimètre utilisé : Agilent N7786B.....	44
2.2.3	Acquisition et traitement des données .....	45
2.2.3.1	Processus d'acquisition des données .....	45
2.2.3.2	Traitement des données issues du polarimètre.....	46
2.2.4	Analyse des événements de polarisation mesurés par le polarimètre .....	51
2.2.4.1	Définition d'un évènement de polarisation et seuil de détection.....	51
2.2.4.2	Analyse hebdomadaire des événements de polarisation.....	54
2.2.4.3	Corrélation entre les déflections angulaires maximales et les vitesses de rotation du vecteur de Stokes maximales observées durant les événements de polarisation .....	56
2.2.4.4	Statistiques sur l'arrivée des événements .....	57
2.3	Analyse des mesures du polarimètre sur une liaison cohérente à 100 Gbit/s .....	60
2.3.1	Présentation de la liaison enfouie à 100 Gbit/s.....	60
2.3.2	Présentation du polarimètre étudié : Novoptel PM500.....	61
2.3.3	Acquisition et traitement des données du polarimètre.....	61
2.3.4	Analyse des mesures du polarimètre PM500.....	64
2.3.4.1	Analyse des mesures du polarimètre PM500 en mode déclenché.....	64
2.3.4.2	Analyse des mesures du polarimètre PM500 en mode continue.....	66
2.4	Conclusion .....	67
<b>CHAPITRE 3 ANALYSE COMPARATIVE DE PERFORMANCE DE TROIS LIAISONS OPTIQUES .....</b> 69		
3.1	Introduction.....	69
3.2	Environnement et architecture des liaisons optiques comparées .....	69
3.3	Revue des analyses sur les mesures .....	74
3.3.1	Liaison optique interurbaine CANARIE .....	74
3.3.2	Liaison optique commerciale de la Côte Ouest .....	74
3.3.3	Liaison optique expérimentale de Dallas .....	75
3.4	Analyse comparative du comportement dynamique en polarisation .....	76
3.4.1	Comparaison des histogrammes de vitesses de rotation du vecteur de Stokes.....	76
3.4.2	Comparaison des effets de polarisation .....	77
3.5	Conclusion .....	78
<b>CHAPITRE 4 SUIVI DE L'ÉTAT DE POLARISATION PAR UN RÉCEPTEUR COHÉRENT .....</b> 79		

4.1	Introduction.....	79
4.2	Récepteur cohérent et estimation de paramètres de ligne et de performance.....	79
4.2.1	Estimation des paramètres de ligne et de performance.....	79
4.2.2	Compensation et suivi de l'état de la polarisation .....	80
4.2.2.1	Compensation de la CD .....	80
4.2.2.2	Compensation de la PMD .....	81
4.2.2.3	Techniques de suivi de l'état de polarisation.....	81
4.3	Bande passante du filtre adaptatif et erreur de suivi de l'état de polarisation .....	84
4.3.1	Modélisation .....	85
4.3.2	Processus d'analyse de l'erreur de suivi de la polarisation.....	86
4.3.2.1	Traitement des données.....	86
4.3.2.2	Filtrage LPF .....	87
4.3.2.3	Calcul de l'erreur de suivi angulaire $\Theta$ .....	89
4.3.3	Résultats de l'analyse.....	90
4.3.3.1	Histogramme des erreurs de suivi angulaire .....	90
4.3.3.2	Histogramme en 3D des angles $\Theta$ et $\phi$ .....	92
4.3.3.3	SNR <sub>LMS</sub> ( $\Theta$ , $\phi$ ) .....	99
4.3.3.4	Histogramme des SNR <sub>LMS</sub> ( $\Theta$ , $\phi$ ) .....	101
4.3.3.5	Histogramme des NSR <sub>LMS</sub> .....	103
4.3.3.6	Distribution de probabilité cumulative complémentaire de NSR <sub>LMS</sub> .....	105
4.4	Conclusion .....	107
	CONCLUSION.....	109
ANNEXE I	PARTITIONNEMENT DES FICHIERS DE MESURE POUR LE PROCESSUS DE CALCUL PARALLÈLE DES DONNÉES DU POLARIMÈTRE.....	113
ANNEXE II	FORMATION DE LA MATRICE DES VITESSES DE ROTATION DU VECTEUR DE STOKES .....	115
ANNEXE III	TRAITEMENT DES DONNÉES DU POLARIMÈTRE 40 G .....	117
ANNEXE IV	DETECTION DES ÉVÈNEMENTS DE POLARISATION .....	119
ANNEXE V	TRAITEMENT DES DONNÉES DU POLARIMÈTRE 100 G .....	121
ANNEXE VI	ESTIMATION DE L'ERREUR DE SUIVI DE LA POLARISATION .....	125
ANNEXE VII	TRANSFORMÉE DE FOURIER RAPIDE .....	127
ANNEXE VIII	TRACÉ D'HISTOGRAMME DE L'ERREUR DE SUIVI DE LA POLARISATION .....	129

ANNEXE IX	HISTOGRAMMES DE L'ERREUR DE SUIVI DE LA POLARISATION .....	133
ANNEXE X	TRAITEMENT HISTOGRAMME EN 3D DES ANGLES $\theta$ et $\phi$ ET SNR <sub>LMS</sub> .....	137
ANNEXE XI	FORMATION DE LA MATRICE DE ROTATION R : LA FONCTION ROTATIONALONGARC_MULTI ET STOKESROTATION.....	141
ANNEXE XII	TRACÉ DES HISTOGRAMMES 3D DES ANGLES $\theta$ et $\phi$ ET SNR <sub>LMS</sub> .....	147
ANNEXE XIII	HISTOGRAMMES DES ANGLES $\theta$ et $\phi$ .....	151
ANNEXE XIV	TRACÉ DE LA TABLE DE CONSULTATION DE SNR <sub>LMS</sub> .....	155
ANNEXE XV	HISTOGRAMMES DES SNR <sub>LMS</sub> ( $\theta$ , $\phi$ ).....	157
ANNEXE XVI	HISTOGRAMMES DES NSR <sub>LMS</sub> .....	161
ANNEXE XVII	DISTRIBUTION DE CPD .....	163
ANNEXE XVIII	TRACÉ DU GRAPHE CPD.....	165
BIBLIOGRAPHIE .....		167

## LISTE DES TABLEAUX

	Page	
Tableau 1.1	Récapitulatif des expériences de monitoring avec un polarimètre .....	24
Tableau 1.2	Récapitulatif des expériences de monitoring avec un polarimètre (suite) .....	25
Tableau 1.3	Récapitulatif des expériences de monitoring avec un transpondeur cohérent.....	33
Tableau 1.4	Quelques chiffres sur les effets transitoires de polarisation.....	40
Tableau 2.1	Statistique journalière des évènements de polarisation .....	55
Tableau 2.2	Période des mesures du polarimètre (100G).....	62
Tableau 3.1	Caractéristiques des trois liaisons optiques cohérentes .....	70
Tableau 3.2	Caractéristiques des trois liaisons optiques cohérentes (Suite).....	71
Tableau 3.3	Récapitulatif des données de monitoring recueillies .....	73
Tableau 3.4	Comparaison des vitesses .....	76
Tableau 3.5	Caractérisation des valeurs de PMD et PDL.....	77
Tableau 4.1	Probabilité que le $NSR_{LMS}$ excède $10^{-3}$ pour différentes valeurs de bande passante du filtre adaptatif.....	107



## LISTE DES FIGURES

	Page	
Figure 1.1	Distribution des champs électriques et magnétiques .....	11
Figure 1.2	États de polarisation représentés sur la sphère de Poincaré.....	13
Figure 1.3	Effets PMD sur le signal optique dans une section.....	14
Figure 1.4	Représentation des effets des différents PMD .....	15
Figure 1.5	Schéma de la PDL lors de la transmission du signal optique .....	17
Figure 1.6	Représentation de quelques fluctuations de l'état de polarisation.....	19
Figure 1.7	Schéma générale d'un polarimètre.....	22
Figure 1.8	Schéma général d'un polarimètre à détection séquentielle .....	23
Figure 1.9	Schéma d'un récepteur cohérent.....	27
Figure 1.10	Schéma d'un récepteur cohérent .....	28
Figure 1.11	Diagramme du transpondeur cohérent .....	28
Figure 1.12	Architecture d'un transmetteur.....	29
Figure 1.13	Architecture du récepteur cohérent .....	30
Figure 1.14	Diagramme du processus de traitement de signal optique reçu .....	30
Figure 1.15	Diagramme de fonctionnement de l'algorithme LMS .....	32
Figure 2.1	Schéma du montage expérimental utilisé pour le monitoring de la liaison optique aérienne à 40 Gbit/s.....	44
Figure 2.2	Architecture du synthétiseur de polarisation d'Agilent .....	45
Figure 2.3	Traitement des données du polarimètre .....	47
Figure 2.4 C	onstituants d'un fichier .....	48
Figure 2.5	Distribution des vitesses de rotation des mesures B2B du polarimètre et ajustement avec une distribution gamma généralisée.....	52

Figure 2.6	Ajustement d'une distribution gamma généralisée sur les vitesses de rotation du vecteur de Stokes de toutes les mesures issues du polarimètre (octobre 2012 à octobre 2014).....	53
Figure 2.7	Histogramme des maximums vitesses de rotation .....	56
Figure 2.8	Distribution des temps d'arrivée des évènements de polarisation sur une période d'observation de 84 heures.....	58
Figure 2.9	Courbe de la valeur moyenne des intervalles de temps entre les fichiers.....	59
Figure 2.10	Schéma du montage expérimental utilisé pour le monitoring de la liaison.....	61
Figure 2.11	Éléments d'un fichier de mesures du polarimètre.....	63
Figure 2.12	Histogramme des vitesses de rotation du vecteur de Stokes des données issues du polarimètre en mode déclenché ( du 5 août au 11 septembre 2015) .....	64
Figure 2.13	Corrélation entre défexion angulaire .....	65
Figure 2.14	Signature des 500 évènements de polarisation les plus rapides observés..	66
Figure 2.15	Histogramme des vitesses de rotation du vecteur de Stokes.....	67
Figure 4.1	Diagramme à haut niveau du .....	86
Figure 4.2	Diagramme du filtrage LPF .....	88
Figure 4.3	Diagramme du calcul de .....	89
Figure 4.4	Histogramme des erreurs de suivi angulaire pour un filtre de suivi de bande passante de 1 kHz (en haut) et de 6 kHz (en bas).....	91
Figure 4.5	Représentation sur la sphère de Poincaré du vecteur de l'erreur de suivi de la polarisation (en bleu le vecteur E et en rouge l'axe (+1,0,0)) .....	94
Figure 4.6	Diagramme du processus .....	95
Figure 4.7	Illustration du contenu .....	96
Figure 4.8	Distribution joint des angles $\theta$ et $\phi$ pour un filtre de suivi de bande passante de 1 kHz (en haut) et de 6 kHz (en bas) .....	98
Figure 4.9	Table lookup de $SNRLMS\theta, \phi$ pour la modulation QPSK.....	100

Figure 4.10	Table de correspondance entre $\theta$ et $\phi$ .....	100
Figure 4.11	Diagramme du processus .....	101
Figure 4.12	Histogramme des $SNRLMS\theta, \phi$ pour un filtre de suivi de bande passante de 1 kHz (en haut) et de 6 kHz (en bas) .....	102
Figure 4.13	Diagramme de calcul .....	103
Figure 4.14	Histogramme des $NSRLMS$ pour un filtre de suivi de bande passante....	104
Figure 4.15	Diagramme de calcul de distribution de probabilité cumulative complémentaire de $NSRLMS$ pour une bande passante B du filtre adaptatif.....	105
Figure 4.16	Distribution de probabilité cumulative complémentaire de $NSRLMS$ pour différentes valeurs de bande passante du filtre adaptatif.....	106



## **LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES**

ASE	Amplified Spontaneous Emission
ASIC	Application-Specific Integrated Circuit
BER	Bit Error Rate
CD	Chromatic Dispersion
CMA	Constant Modulus Algorithm
DCF	Dispersion Compensating Fiber
DGD	Differential Group Delay
DOP	Degree Of Polarization
DP-QPSK	Dual Polarization Quadrature Phase Shift Keying
DSP	Digital Signal Processing
EDFA	Erbium-doped Fiber Amplifier
FEC	Forward Error Correction
FIR	Finite Impulse Response
LMS	Least Mean Square
LO	Local oscillator
LOS	Linear Optical Sampling
OPM	Optical Performance Monitoring
OSNR	Optical Signal to Noise Ratio
OXC	Optical Cross-Connect
PDL	Polarization Dependant Loss
PMD	Polarization Mode Dispersion

PSP	Principal State of Polarization
ROADM	Reconfigurable Add Drop Multiplexer
SNR	Signal to Noise Ratio
SOP	State Of Polarization
SOPMD	Second Order Polarization Mode Dispersion
WDM	Wavelength Division Multiplexing

## LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

### **UNITÉS LIÉES AU TEMPS**

s	seconde
ms	milliseconde ( $10^{-3}$ s)
$\mu$ s	microseconde ( $10^{-6}$ s)
ns	nanoseconde ( $10^{-9}$ s)
ps	picoseconde ( $10^{-12}$ s)
Hz	Hertz
kHz	kilohertz ( $10^3$ Hz)
MHz	mégahertz ( $10^6$ Hz)
GHz	gigahertz ( $10^9$ Hz)
THz	térahertz ( $10^{12}$ Hz)

### **UNITÉS DE PUISSANCE**

W	Watt
mW	milliwatt ( $10^{-3}$ W)
dB	décibel
dBm	décibel (référence à 1 mW)

### **UNITÉS DE DISTANCE**

m	mètre
km	kilomètre ( $10^3$ m)

### **UNITÉS DE DÉBIT BINAIRE**

bit	bit
Mbit	mégabit ( $10^6$ bits)
Gbit	gigabit ( $10^9$ bits)

### **SYMBOLES**

$\lambda$	longueur d'onde
$\gamma$	déflexion angulaire
rad	radian
$^\circ$	degré
To	Téraoctet



## INTRODUCTION

La détection cohérente combinée aux performances des modules de traitement de signal numérique (*Digital Signal Processing*, DSP) et aux formats de modulation avancés permet de concevoir des systèmes de transmission optique ayant des débits de plus en plus élevés (40 Gbit/s ; 100 Gbit/s ; 400 Gbit/s et plus).

Ces systèmes de transmission cohérents de plus en plus déployés sont plus sensibles aux effets de polarisation, car ils fonctionnent à plus de 10 Gbit/s et utilisent des formats de modulation à multiplexage de polarisation (A. et J., 2012). Ces effets de polarisation causent dans ces systèmes une dégradation de la qualité du signal. Cependant, ces effets de polarisation sont difficiles à caractériser, car ils varient aléatoirement dans le temps selon l'environnement de déploiement de la fibre optique.

La caractérisation des effets de polarisation sur les liaisons optiques commerciales permettrait d'avoir une meilleure connaissance des fluctuations de la polarisation dans les systèmes optiques installés. Cette meilleure connaissance des effets de polarisation pourrait servir à la conception de transpondeurs cohérents plus robustes aux effets de polarisation mais aussi à anticiper la dégradation de la qualité du signal d'une liaison optique due aux effets de polarisations.

Plusieurs travaux ont visé à pallier ce manque par le monitoring de liaisons optiques commerciales. Ce projet, réalisé avec la collaboration de Ciena et fournisseur de services nord-américain, apporte des connaissances en plus sur la dynamique des effets de polarisation dans les liaisons optiques cohérentes et s'inscrit dans une continuité des travaux de Mortelette (2014), Brugière (2015) et Michel (2016).

L'objectif de ce projet est de présenter les résultats des analyses effectuées sur deux types de liaisons optiques commerciales afin de caractériser et comparer les effets de polarisation pouvant se produire sur une liaison aérienne et sur une liaison enfouie. Cela a été possible par

l'usage de deux instruments afin de mesurer des paramètres sur les liaisons sous étude et l'analyse de ces mesures par des outils développés sous MATLAB. Le premier instrument de monitoring est un polarimètre, instrument par excellence utilisé pour mesurer les paramètres de Stokes d'un signal optique. Le deuxième instrument utilisé est un transpondeur cohérent. L'exploitation des capacités de monitoring du transpondeur cohérent donne une coloration particulière à ce projet.

Ce mémoire regroupe quatre chapitres. Le premier chapitre pose les jalons de ce projet par une étude bibliographique permettant de définir les concepts majeurs du projet. Il présente d'abord les objectifs et défis du monitoring de réseau optique, ensuite les principaux paramètres de performance d'une liaison optique et enfin une revue des expériences de monitoring des effets de polarisation de liaisons optiques. Le deuxième chapitre présente les analyses statistiques qui ont été effectuées sur deux liaisons cohérentes. Dans la première partie de ce deuxième chapitre sont analysés les effets de polarisation observés sur une liaison aérienne commerciale à 40 Gbit/s d'un fournisseur de services nord-américain. Dans la deuxième partie de ce deuxième chapitre sont analysés les résultats du monitoring d'une liaison optique enfouie à 100 Gbit/s. Ensuite dans le troisième chapitre, une synthèse des travaux effectués sur le monitoring de différentes liaisons optiques est présentée. Comme annoncé plus haut, l'un des enjeux de ce projet étant la conception de transpondeur cohérent plus robuste aux effets de polarisation, dans le quatrième chapitre une étude de l'erreur de suivi de l'état de polarisation d'un transpondeur cohérent est présentée.

La contribution de ce mémoire (traitée au chapitre 2) a consisté à adapter les scripts développés par Brugiére (2015) pour la détection des événements de polarisation correspondant au nouveau seuil de 1,27 rad/ms. Présentée au chapitre 3, les contributions additionnelles ont consisté à adapter des scripts développés par Brugiére (2015) pour correspondre à la structure des fichiers de mesure du polarimètre provenant de la liaison à 100 Gbit/s, et un nouveau script pour la conversion des fichiers binaires en fichiers MATLAB. Au chapitre 4, la contribution a été de poursuivre la conception de scripts pour l'étude de l'erreur de suivi de l'état de polarisation d'un transpondeur cohérent. Par ailleurs, la participation à la rédaction d'un article

de conférence (Brugièvre et al., 2016; Chan, 2010) portant sur l'analyse des résultats et présenté dans le cadre de la conférence internationale la plus importante dans le domaine des communications optiques (*Optical Fiber Communication Conference and Exposition*, OFC) est également une contribution importante reliée à ces travaux.



## **CHAPITRE 1**

### **MONITORING DE LIAISONS OPTIQUES À HAUT DÉBIT**

#### **1.1 Introduction**

Dans ce chapitre, il s'agit d'une étude bibliographique afin d'approfondir les connaissances dans le domaine du monitoring de liaisons optiques. Il est organisé en trois grandes parties.

La première partie est une introduction à la notion de monitoring de réseau. Elle présente les objectifs et défis du monitoring de réseau optique ainsi que les deux grandes familles de technique de monitoring. La deuxième partie présente les notions de base des paramètres de performance d'une liaison optique qu'il est nécessaire de monitorer. Et enfin la troisième partie est une revue des expériences de monitoring des effets de polarisation de liaisons optiques. Elle expose sur des expériences théoriques, expérimentales et sur des liaisons commerciales.

#### **1.2 Monitoring de liaisons optiques**

Le monitoring de réseaux est le fait de mesurer en temps réel l'état physique des éléments d'une infrastructure réseau, l'état du chemin réseau et la qualité du signal (Chan, 2010). Un bon monitoring avec des méthodes de mesures précises pourrait conduire à une conception et une exploitation efficace des réseaux actuels.

Une liaison optique est constituée de fibre optique, d'équipements terminaux (transmetteurs et récepteurs optiques) et d'équipements de ligne (amplificateurs et commutateurs optiques). Elle assure le transport de données sous forme de signaux lumineux entre une source et une destination et peut s'étendre sur des dizaines, centaines et milliers de kilomètres.

Le monitoring de liaisons optiques se présente donc comme le contrôle d'un ensemble complexe. Dans cette première section, nous présentons les objectifs, difficultés et défis pour atteindre un monitoring de haute performance et les deux groupes de techniques de monitoring.

### 1.2.1 Objectifs du monitoring de liaisons optiques

Dans les liaisons optiques à haut débit ( $>10$  Gbit/s), plusieurs paramètres sont introduits pour augmenter la capacité de transmission. Ces paramètres sont : les formats de modulation, le nombre de canaux, la puissance du signal, la dispersion et les effets non linéaires. Ces paramètres viennent complexifier le réseau et réduire sa fenêtre d'opérabilité (Chan, 2010). Le monitoring permet donc de pouvoir gérer cette fenêtre en l'élargissant ou en maintenant la qualité du réseau malgré une petite fenêtre d'opérabilité. L'objectif majeur est donc selon Chung (2008) de minimiser les interruptions de service et maximiser la disponibilité du réseau.

Le monitoring de base de la couche physique des réseaux optiques est possible par des équipements tels que les réflectomètres, les puissancemètres, les analyseurs de spectre, etc. Il permet de :

- surveiller les pertes de puissances dues au sectionnement (bris) d'une fibre optique ou à une panne d'un laser/amplificateur;
- surveiller le spectre des canaux dans les réseaux WDM (Wavelength Division Multiplexing);
- mesurer l'OSNR (Optical Signal to Noise Ratio) pour contrôler le bruit généré par les amplificateurs optiques.

Un monitoring plus poussé est nécessaire pour mesurer les défaillances, diagnostiquer leurs sources et fournir des informations aux contrôleurs réseau pour le ré-routage du trafic, le contrôle et la gestion du réseau ainsi que faire des ajustements (compensation de dispersion, égalisation etc.). Le monitoring de l'état physique des éléments du réseau, du chemin et de la qualité de la propagation des signaux de données permet d'optimiser l'utilisation des ressources réseau, d'avoir des réseaux plus performants, plus robustes, évolutifs, intelligents et autogérés.

### 1.2.2 Difficultés et défis du monitoring de liaisons optiques

Pour répondre à tous les objectifs cités plus haut, le monitoring fait face à plusieurs difficultés, à savoir selon (Chan, 2010) :

- difficulté d'identification des défauts dans les réseaux tout optiques à cause des *soft faults*, qui sont des défauts non persistants dans le temps et qui sont causés par des déficiences optiques telles que les effets de polarisation;
- l'aspect stochastique (variation aléatoire dans le temps) de certaines dégradations ;
- le grand nombre de déficiences déclenchant plusieurs alarmes;
- la variété des formats de données;
- la variété des débits de données;
- le changement de la configuration du réseau;
- la sensibilité des réseaux haut débit aux problèmes de dégradation du signal.

Le monitoring doit être en temps réel et pouvoir fournir un feedback continu pour un meilleur contrôle. Les défis à surmonter pour avoir des techniques de monitoring efficaces selon Chan (2010) et Chung (2008) sont :

- surveiller les paramètres de performances et faire des ajustements aux besoins à l'aide de modèle prédictifs;
- avoir les informations à jour sur la configuration des liaisons optiques;
- localiser toute source de dégradation du signal pour correction et ré-routage du trafic;
- prendre des décisions pour l'allocation dynamique des ressources selon l'interprétation des informations provenant des contrôleurs de réseau. Tout ceci dans le but d'un changement dynamique de la longueur d'onde du canal, d'un ajustement dynamique de la dispersion, d'un choix de format de modulation, de débit binaire, de gain des amplificateurs, et d'allocation de bande passante;
- évaluer la qualité du signal aux différentes longueurs d'onde;
- connaître la disponibilité des chemins optiques dans les commutateurs optiques (ROADM, OXC);
- définir des seuils de protection et restauration des liaisons optiques;

- activation d'alarmes pour les dégradations du signal;
- dépannage sur le réseau pour corriger les pertes de signal;
- prévenir les dénis de service et l'écoute clandestine du réseau en suivant chaque longueur d'onde et vérifier que les effets non linéaires sont bien générés par le réseau ou une éventuelle attaque.

Nous voulons souligner que notre projet de monitoring répondra au défi 1, car la caractérisation effectuée servira à moyen terme à développer des modèles prédictifs pour les effets de polarisation (PMD, PDL, SOP).

### 1.2.3 Techniques de monitoring

Une grande variété de techniques de monitoring existe pour le contrôle des liaisons optiques. Elles permettent le monitoring de plusieurs paramètres de la liaison optique, tels que la puissance du canal, la longueur d'onde, le rapport signal sur bruit optique, le facteur Q, etc.

Ces techniques de monitoring se regroupent en deux grands groupes (selon chan, 2010) :

- les techniques de monitoring des performances optiques (*Optical Performance Monitoring*, OPM) dans le domaine temporel. Ces techniques assurent le monitoring des liaisons optiques en analysant l'évolution temporelle des paramètres de performance. Elles utilisent la détection cohérente, les modules de traitement hors ligne, ainsi que l'échantillonnage linéaire (*linear optical sampling*, LOS);
- les techniques OPM dans le domaine fréquentiel. Elles ont l'avantage d'être moins coûteuses et faciles à implémenter car elles utilisent des filtres moins couteux. Elles montrent le signal en se basant sur l'analyse des changements des différents paramètres du spectre du signal (la puissance, la fréquence, etc.).

## 1.3 Paramètres de performance d'une liaison optique

Cette section présente les paramètres fondamentaux qui sont utilisés pour mesurer le niveau de performance d'une liaison optique. À l'instar des paramètres ci-dessous, la puissance du signal optique est le paramètre de base qui permet d'apprécier la qualité du signal optique transmis dans une liaison et son niveau peut être suivi par sa mesure en différents endroits de la liaison.

### 1.3.1 Taux d'erreur binaire (BER)

Dans une liaison optique numérique, le taux d'erreur sur les bits (*Bit Error Rate*, BER) est le ratio du nombre d'erreurs des bits transmis sur le nombre total de bits dans une fenêtre de temps de transmission. Les erreurs binaires peuvent se produire lors de la reconstitution de l'information transmise par une confusion entre les valeurs des bits (0 ou 1) constituant l'information. Plus nous avons du bruit sur la liaison, plus il est probable d'avoir des erreurs. Un BER de  $10^{-3}$  signifie que l'on a en moyenne une erreur binaire sur mille bits transmis. Plusieurs méthodes permettent de réduire le taux d'erreur dont les codes correcteurs d'erreurs (*Forward Error Correction*, FEC).

### 1.3.2 Rapport signal sur bruit (SNR/OSNR)

Ce paramètre très utilisé pour avoir l'information directe sur la qualité du canal de transmission. Il désigne le rapport de puissance entre la puissance maximale du signal (*Signal Noise Ratio*, SNR) et celle du bruit. Il est généralement exprimé en décibel (dB).

Dans les liaisons optiques, on parlera de rapport signal sur bruit optique (*Optical Signal to Noise Ratio*, OSNR).

### 1.3.3 Dispersion chromatique

La dispersion chromatique (*Chromatic Dispersion*, CD) est liée au fait que l'indice de réfraction varie avec la longueur d'onde (ou fréquence) se propageant dans la fibre optique. La vitesse étant fonction de l'indice de réfraction, chaque longueur d'onde aura une vitesse de propagation différente, et donc en fin de ligne on aura des impulsions élargies. Chaque fibre optique détient une valeur spécifique de coefficient de dispersion chromatique. Ce coefficient est exprimé en ps/ nm.km. La CD augmente linéairement avec la longueur de la fibre optique et la largeur spectrale de la source lumineuse. Elle est un effet linéaire qui dégrade la qualité des impulsions se propageant dans la fibre optique. La tolérance à la CD est proportionnelle à l'inverse du carré du débit binaire (Chan, 2010). Ainsi lorsque le débit augmente la tolérance à la CD diminue. Par exemple, un signal à 40 Gbit/s est 16 fois plus sensible aux effets de la dispersion chromatique qu'un signal à 10 Gbit/s (Chan, 2010).

### 1.3.4 Polarisation de la lumière et ses effets

Les signaux transportés dans les réseaux optiques étant des signaux lumineux, il nous semble important de parler de la lumière et de sa polarisation.

#### 1.3.4.1 Polarisation de la lumière

La lumière est une onde électromagnétique ayant donc un champ magnétique H et électrique E (voir figure 2.1). Toute onde électromagnétique a une propriété de polarisation. Pendant longtemps (par convention), la polarisation de la lumière était décrite par la variation de son champ électrique. À partir des équations de Maxwell, le champ électrique est représenté dans un plan complexe par l'équation (2.1) :

$$\vec{E}(t) = \vec{E}_0 e^{i(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r} + \varphi)} \quad (1.1)$$

où  $E_0(t)$  désigne le vecteur d'amplitude de l'onde,  $\omega$  la pulsation de l'onde,  $k$  le vecteur d'onde,  $r$  le vecteur position à partir du point d'observation, et  $\varphi$  la phase à la source de l'onde.

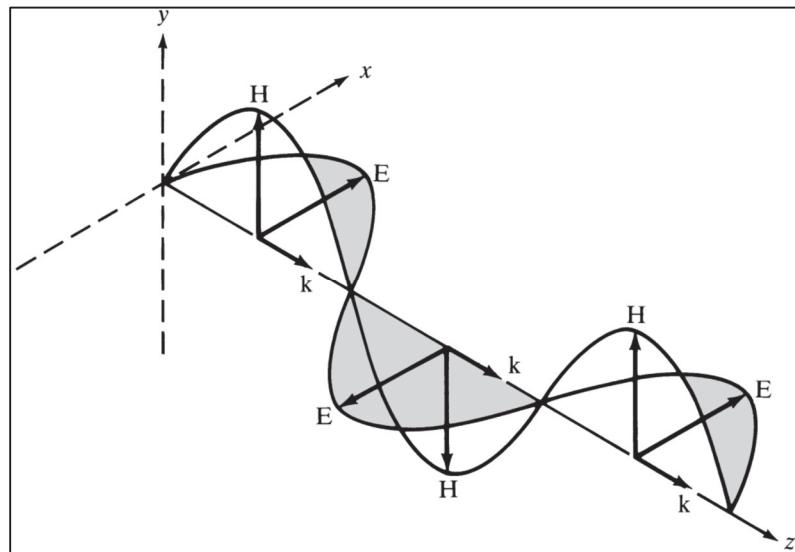


Figure 1.1 Distribution des champs électriques et magnétiques  
d'une onde électromagnétique  
Tirée de Keiser (1991)

Dans le cas des liaisons optiques cohérentes où l'on utilise le multiplexage en polarisation, le signal optique cohérent est composé de deux modes de polarisation X et Y. l'équation (1.2) d'une onde lumineuse polarisée est :

$$\vec{E} = \vec{a}_x E_{x0} \cos(\omega t - kz) + \vec{a}_y E_{y0} \cos(\omega t - kz - \varphi) \quad (1.2)$$

où  $a_x$  et  $a_y$ : vecteurs unitaires du plan orthogonal et définissant la direction et le sens de polarisation de l'onde lumineuse.

$E_x$  et  $E_y$ : respectivement champ électrique transversal et champ magnétique transversal.

$E_{x0}$  et  $E_{y0}$  : respectivement amplitude du mode de polarisation X et Y.

t et  $\omega$  : respectivement le temps (un instant donné) et la fréquence de l'onde lumineuse.

$z$  : axe de propagation dans la fibre optique et  $\varphi$  : retard de phase entre les deux polarisations.

Plusieurs états de polarisations sont possibles:

- polarisation linéaire :  $\varphi=0$ ;
- polarisation circulaire :  $\varphi = \Pi/2$  et  $E_x = E_y$ ;
- polarisation elliptique :  $\varphi \neq 0$  et  $\varphi \neq \Pi/2$ ;
- si  $\varphi$  négatif, on parle de polarisation elliptique négative ou polarisation gauche (sens de rotation contraire à celui d'une aiguille de montre);
- si  $\varphi$  positif, on parle polarisation elliptique positive ou polarisation droite (sens de rotation dans le sens de l'aiguille d'une montre).

### **Représentation de l'état de polarisation de l'onde lumineuse**

L'état de polarisation d'une onde lumineuse décrit un ensemble de caractéristiques de son vecteur de propagation, c'est-à-dire son sens, sa norme et sa direction, à un instant donné. Les états de polarisation de l'onde peuvent être représentés aussi bien mathématiquement que graphiquement. La représentation mathématique des états de polarisation peut être faite par le vecteur de Jones associé à la matrice de Jones (uniquement pour les ondes totalement polarisées) ou par le vecteur de Stokes associé à la matrice de Mueller. Le plus utilisé est le vecteur de Stokes. Il permet de décrire autant une lumière non polarisée qu'une lumière totalement polarisée ou partiellement polarisée. La représentation graphique est faite sur la sphère de Poincaré(Voir Figure 1.2).

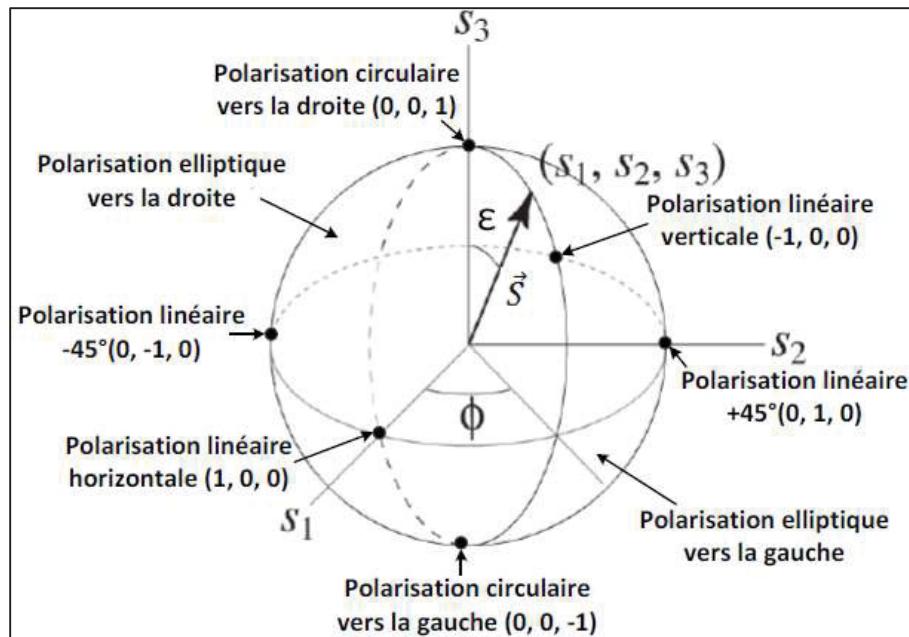


Figure 1.2 États de polarisation représentés sur la sphère de Poincaré  
Adaptée de Cantrell (2004, p.33)

### 1.3.4.2 Dispersion des modes de polarisation

La dispersion des modes de polarisation (*Polarization Mode Dispersion*, PMD) apparaît lorsque dans une fibre monomode l'énergie du signal lumineux à une longueur d'onde donnée se propage dans les deux principaux états de polarisation (*Principal state of polarization*, PSP) et que ces deux PSPs ont des vitesses légèrement différentes en raison de la biréfringence dans la fibre.

La biréfringence est le fait que la propagation de la lumière n'est pas uniforme dans toutes les directions lorsque le cœur de la fibre n'est pas parfaitement circulaire et symétrique. Elle apparaît dans une fibre optique lorsque la symétrie circulaire du cœur de la fibre est rompue par des effets extérieurs (stress sur le câble, température, vent, vibrations) ou encore lors des processus de fabrication de la fibre (voir Figure 1.3). La différence des indices de réfraction efficace  $\Delta n_{\text{eff}}$  est une mesure de la biréfringence dans une fibre et elle est en général dans l'ordre de  $10^{-7}$  à  $10^{-5}$ .

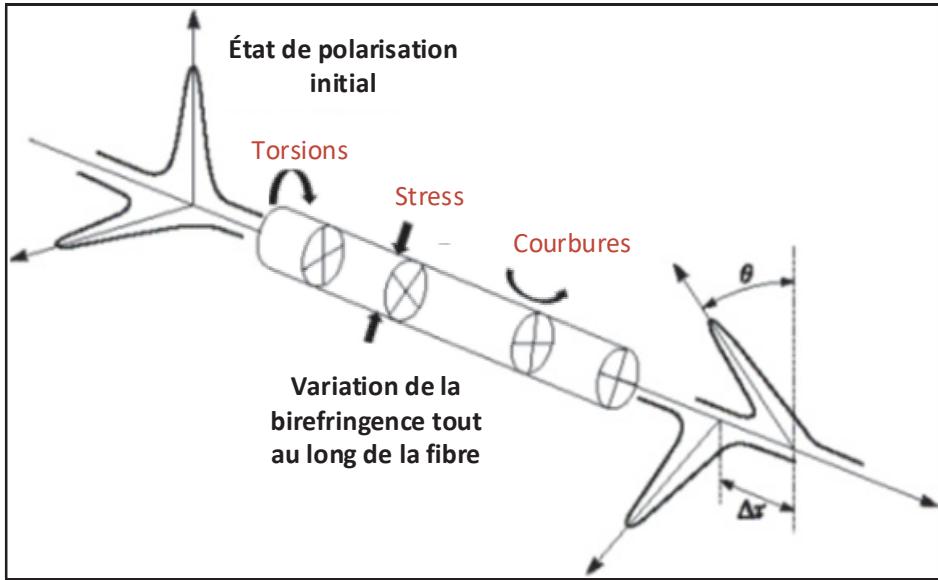


Figure 1.3 Effets PMD sur le signal optique dans une section de fibre optique  
Adaptée de Keiser (2011)

#### 1.3.4.3 Ordre de PMD et conséquences

La PMD, selon la cause spécifique et son effet, peut être définie comme PMD de 1<sup>er</sup> ordre ou comme PMD de second ordre.

Dans un milieu biréfringent, les PSPs n'auront pas la même vitesse, car l'indice de réfraction varie légèrement avec la direction de polarisation de l'onde lumineuse. Le délai entre les temps de propagation des deux modes principaux de polarisation est le délai de groupe différentiel (*Differential Group Delay*, DGD), connu aussi comme la PMD de premier ordre. La conséquence de la DGD est la différence de délai entre les deux PSPs (voir Figure 1.4). La PMD de deuxième ordre (*Second order PMD*, SOPMD) est causée par le changement de la DGD avec la longueur d'onde. Comme la SOPMD dépend de la bande passante, on peut dire qu'elle varie avec le débit. La conséquence de la SOPMD est l'étalement de l'impulsion (voir figure 2.4) et une dépolarisation dans un cas sévère (Chan, 2010). Dans le cas d'une PMD sévère, le récepteur peut ne pas être capable de décoder le signal, ce qui engendre des erreurs binaires. Si le BER est trop élevé, le lien peut être mis hors service (Chan, 2010).

Dans les systèmes à plus de 40 Gbit/s, une PMD élevée réduit la distance de transmission possible. Et pour une même valeur de PMD, un signal se propageant dans un lien composé de plusieurs segments ira moins loin que dans un lien avec moins de segments (Chan, 2010). Notons que dans la plupart des cas, lors de la mesure de la tolérance de la PMD d'un système, la SOPMD est négligée par simplification et peut ainsi sous-estimer la panne due à la PMD dans un réseau (Source : [www.newridgetech.com](http://www.newridgetech.com) ).

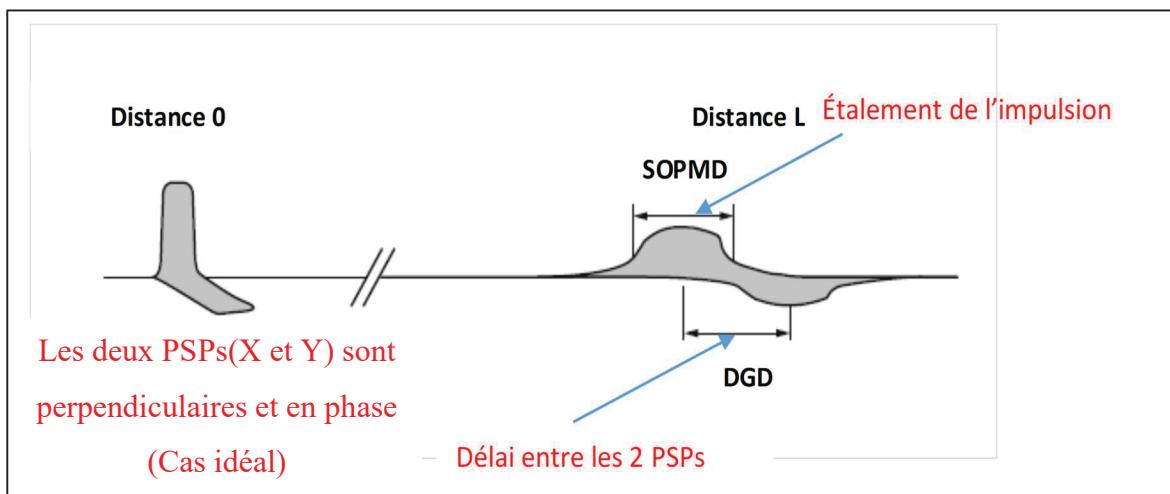


Figure 1.4 Représentation des effets des différents PMD  
Adaptée de Chan (2010)

#### 1.3.4.4 Mesure de la PMD

En raison de ses effets nuisibles stochastiques, la PMD se différencie des autres paramètres tels que la dispersion chromatique (CD). Il est donc un phénomène instable tout au long de la propagation du signal dans la fibre optique ; il est donc difficile de faire un mode de compensation passive de la PMD comme cela se fait avec la dispersion chromatique (Peterson Jr, 2004).

L'aspect dynamique de la PMD est dû d'une part aux asymétries de la fibre qui varie d'une section à l'autre, et d'autre part aux mouvements de la fibre dus au stress qui sont assez variables. Il existe plusieurs sources de stress mécanique sur la fibre optique : variations

journalières ; saisonnières ; vibrations ; vent pour les câbles aériens. La PMD n'ayant pas une valeur unique constante, on parlera de PMD instantanée (DGD<sub>inst</sub>) et pour un segment donné on parlera de DGD moyen (la moyenne de la valeur de la DGD tout au long de ce segment). Une fibre optique sera caractérisée par son coefficient de PMD et une fois déployée elle se caractérisera par une distribution (PDF) des valeurs de DGD instantanée.

Les premières difficultés liées à la PMD apparaissent lors du déploiement des systèmes 10 Gbit/s sur des anciennes fibres optiques (fabriquées entre les années 1980 et le début des années 1990) (Peterson Jr, 2004). La PMD est devenue l'un des paramètres surveillés dans les réseaux à haut débit, car son impact est plus grand dans ces réseaux optiques conventionnels (*Intensity Modulation - Direct Detection*, IM-DD) à 10 Gbits/s et plus (Peterson Jr, 2004). Cela s'explique aisément vu que la PMD provoque un élargissement de l'impulsion, et combinée à la perte dépendante de la polarisation PDL peut produire des grandes distorsions, limitant ainsi la transmission dans les réseaux haut débit et surtout en multiplexage de polarisation.

Dans les systèmes cohérents, pour solutionner aux effets nuisibles de la PMD, le module DSP compense la PMD, pourvu que les effets de polarisation ne soient pas trop rapides. La valeur de PMD dans une liaison optique s'obtient en faisant la moyenne de la DGD instantanée à un temps t donné. On parle très souvent de délai PMD  $\Delta t$  [ps] et de coefficient de PMD  $\Delta t_c$  exprimé [ps $\sqrt{\text{km}}$ ] par les manufacturiers à partir de 1995 (Chan, 2010). Le coefficient de PMD est dans l'ordre de 0.1 à 10 ps/ $\sqrt{\text{km}}$ . Les coefficients de PMD les plus élevés ont été mesurés sur des fibres optiques fabriquées avant 1994 (Peterson Jr, 2004). À cause de l'aspect aléatoire des variations le long de la fibre de transmission, la valeur de PMD (le délai PMD) dans un segment de fibre donné dépend de la racine carrée de la longueur de transmission, tel que défini dans l'équation (1.3).

$$\Delta t = \sqrt{L} * \Delta t_c \quad (1.3)$$

La PMD totale d'un lien est la somme de celle introduite par la fibre optique et celle des autres composants du lien. Les composants pouvant introduits de la PMD sont les isolateurs,

coupleurs, multiplexeurs. La PMD d'un composant peut être négligeable, mais à plusieurs, ils pourraient ajouter une PMD significative le long du lien(Chan, 2010).

#### 1.3.4.5 La perte dépendante de la polarisation

La perte d'insertion des composants optiques passifs (les commutateurs, isolateurs, coupleurs, filtres, circulateurs, etc.) varie en fonction de l'état de polarisation du signal traversant le dispositif (voir Figure 1.5).

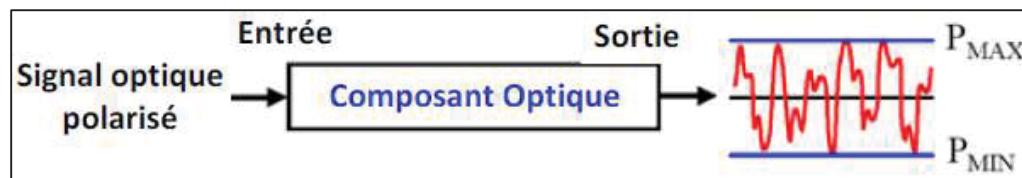


Figure 1.5 Schéma de la PDL lors de la transmission du signal optique dans un composant optique  
Adaptée de Agilent (2002)

La PDL s'exprime en dB et définit le ratio entre la puissance maximum et minimum du signal traversant le dispositif comme indiqué par l'équation (2.4), tirée de (Agilent,2002).

$$PDL_{dB} = 10 \log_{10} \left( \frac{P_{max}}{P_{min}} \right) \quad (1.4)$$

La PDL varie aléatoirement en fonction des fluctuations de l'état de polarisation du signal. La PDL peut causer des effets nuisibles dans les liaisons optiques telles que la variation de la puissance optique causant des variations aléatoires du signal reçu et de l'OSNR au récepteur. Et elle limite les performances des compensateurs PMD. La PDL dans les équipements de ligne tels que les commutateurs, isolateurs, coupleurs, filtres, et circulateurs est non négligeable.

### 1.3.5 Fluctuations des états de polarisation

La propagation de la lumière dans une fibre optique peut être affectée par des événements de son environnement de déploiement. Ainsi, l'état de polarisation du signal optique peut changer en fonction des vibrations (vent pour les câbles aériens, passage des voitures ou de train pour les câbles enterrés), de la température (chaleur du soleil, jour/nuit, saison) et des décharges électriques (foudre).

Cette fluctuation de l'état de polarisation est théoriquement expliquée par un phénomène magnéto-optique : effet Faraday ou rotation Faraday (A. et J., 2012). Cet effet cause une rotation du plan de l'état de polarisation du signal optique. L'angle de rotation est linéairement proportionnel à la partie du champ magnétique qui est orienté dans la direction de propagation du signal optique. La relation entre l'angle de rotation  $\beta$  et le champ magnétique  $B$  est donnée par :

$$\beta = \vartheta Bd \quad (1.5)$$

où  $\vartheta$  est la constante de Verdet de la fibre et s'exprime en rad.T<sup>-1</sup>.m<sup>-1</sup>.

Notons que  $\vartheta$  varie en fonction de la longueur d'onde et de la température.

Les fluctuations de la polarisation peuvent être catégorisées selon (Borodistky et al. ,2005) en trois groupes :

- fluctuation rapide et élastique (variation de quelques millisecondes, qui revient à l'état de polarisation initial);
- fluctuation lente et élastique (variation de centaines de millisecondes, qui revient à l'état de polarisation initial);
- fluctuation lente et inélastique (variation de centaines de millisecondes, qui ne revient pas à l'état de polarisation initial).

La Figure 1.6 présente quelques fluctuations possibles de l'état de polarisation dans une liaison optique. Ces fluctuations de l'état de polarisation peuvent produire des erreurs dans la

transmission des données dans les systèmes cohérents si le récepteur n'est pas assez rapide pour suivre les changements de l'état de polarisation. Deux types de fluctuations peuvent causer des problèmes, les fluctuations très rapides et celle qui ont des déflections angulaires élevées.

La déflexion angulaire est la longueur de l'arc d'évolution de l'état de polarisation sur la sphère de Poincaré entre les deux instants. Elle est définie selon (Bao, Waddy et Chen, 2004) par l'équation suivante :

$$\gamma(t1, t2) = \cos^{-1}[\vec{S}(t1) \cdot \vec{S}(t2)] \quad (1.6)$$

où  $\gamma$  est la longueur de l'arc et  $\vec{S}$  est vecteur de Stokes aux instants  $t_1$  et  $t_2$ .

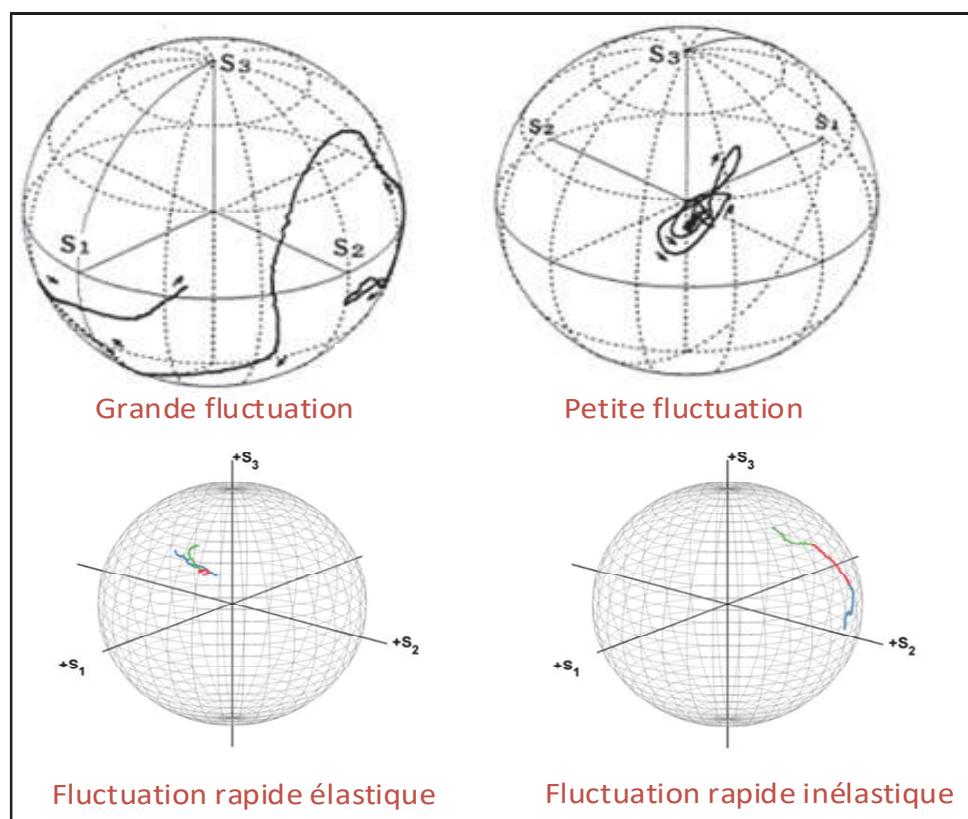


Figure 1.6 Représentation de quelques fluctuations de l'état de polarisation sur la sphère de Poincaré

Adaptée de Kurono (1996) (en haut) et de Brugièvre (2015) (en bas)

## 1.4 Revue des expériences de monitoring de liaisons optiques

Dans cette partie, nous présentons une revue de la littérature des expériences de monitoring et des outils utilisés pour le monitoring de liaisons optiques.

### 1.4.1 Monitoring avec un polarimètre

La meilleure technique de mesure des effets de polarisation consiste à utiliser un polarimètre qui par sa fonction est capable de mesurer les vecteurs de Stokes d'un signal optique.

#### 1.4.1.1 Polarimètre

Le polarimètre sert à déterminer l'état de polarisation d'un signal optique à partir du calcul des paramètres de Stokes. Pour effectuer le calcul des paramètres de Stokes, le polarimètre mesure quatre puissances optiques indépendantes avec différent état de polarisation (Hui et al, 2006) à savoir :

- $P_{0^\circ}$  : puissance optique avec polarisation linéaire horizontale;
- $P_{90^\circ}$  : puissance optique avec polarisation linéaire verticale;
- $P_{+45^\circ}$  : puissance optique avec polarisation linéaire  $+45^\circ$ ;
- $P_{+45^\circ, \lambda/4}$  : puissance optique avec polarisation linéaire  $+45^\circ$  avec un déphasage de  $90^\circ$ .

À partir des équations 3.1 - 3.3, les valeurs des paramètres de Stokes et la valeur du degré de polarisation (*Degree of Polarization*, DOP) (Hui et al, 2006) sont calculées.

$$S_0 = P_{0^\circ} + P_{90^\circ} \quad (1.7)$$

$$S_1 = P_{0^\circ} - P_{90^\circ}$$

$$S_2 = P_{+45^\circ} - P_{-45^\circ} = 2P_{+45^\circ} - S_0$$

$$S_3 = P_{+45^\circ, \lambda/4} - P_{-45^\circ, \lambda/4} = 2P_{+45^\circ, \lambda/4} - S_0$$

$$DOP = \sqrt{(S_1^2 + S_2^2 + S_3^2) / S_0} \quad (1.8)$$

Lorsque la mesure de ces quatre valeurs de puissances se fait en parallèle, on parle de polarimètre à détection parallèle et quand elle se fait de manière séquentielle, on parle de polarimètre à détection séquentielle.

#### **1.4.1.2 Fonctionnement général d'un polarimètre à détection parallèle**

Le fonctionnement d'un polarimètre à détection parallèle (figure 3.1) se fait au travers des différentes étapes énumérées ci-dessous (Hui et al., 2009) :

- le signal optique entrant dans le polarimètre est d'abord divisé en quatre par le diviseur de puissance optique 1x4;
- chacun des 4 portions du signal optique rencontre un polariseur qui sélectionne une polarisation donnée avec un angle d'orientation donnée (soit  $0^\circ$  Pol.,  $90^\circ$  Pol., ou  $45^\circ$  Pol.). Et pour le quatrième signal en plus de l'usage d'un polariseur  $45^\circ$  Pol., un retard de  $90^\circ$  est appliqué entre les composants x et y du signal optique par usage d'une lame quart d'onde( $\lambda/4$ );
- la puissance optique sur chaque branche est détectée par un photodétecteur (PD) qui fournit le paramètre voulu soit  $P_{0^\circ}$ ,  $P_{90^\circ}$ ,  $P_{+45^\circ}$  et  $P_{+45^\circ, \lambda/4}$ ;
- les différentes valeurs de puissances optiques sont analysées par un module de traitement de signal qui calcule les valeurs des différents paramètres de Stokes à partir des équations (1.7).

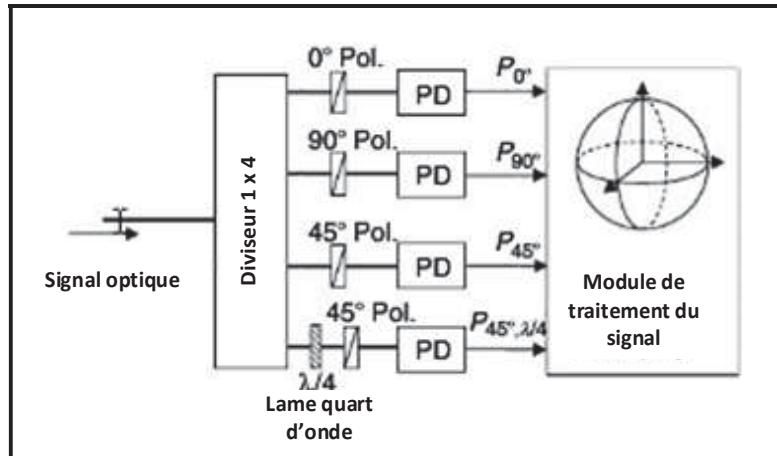


Figure 1.7 Schéma générale d'un polarimètre  
à détection parallèle

Adaptée de Hui et al. (2009, p.194)

#### 1.4.1.3 Fonctionnement général d'un polarimètre à détection séquentielle

Dans un polarimètre à détection séquentielle comme le nom l'indique, la mesure des puissances optiques  $P_{0^\circ}$ ,  $P_{90^\circ}$ ,  $P_{+45^\circ}$  et  $P_{+45^\circ, \lambda/4}$  se fait de façon séquentielle et suit les étapes suivantes (voir figure 3.2) (Hui et al.,2009):

- le signal entrant dans le polarimètre passe à travers un retardateur, une lame quart d'onde et un polariseur ajustable manuellement;
- la puissance est détectée par un photodétecteur(PD) et enregistrée en mémoire.

Les étapes 1 et 2 sont reprises pour l'obtention de chacune des puissances (voir Figure 1.8 a). Bien que ce système soit simple, les mesures s'y font lentement. Cela n'est pas adapté aux réseaux optiques où le changement de polarisation est assez rapide (Hui et al.,2009) . Ainsi une amélioration de ce système a été implémentée avec une utilisation de retardateurs électriquement commutables entre  $90^\circ$  et  $135^\circ$  et entre  $135^\circ$  et  $0^\circ$  et un polariseur fixé à  $0^\circ$  (voir Figure 1.8 b). De plus les innovations de la technologie Crystal, nous permet d'avoir des retardateurs à liquide Crystal ayant une commutation de l'ordre des sous millisecondes. Aussi dans le souci d'une automatisation des mesures, un système de contrôle informatisé est ajouté au système pour synchroniser l'acquisition des données avec l'orientation du retard voulu.

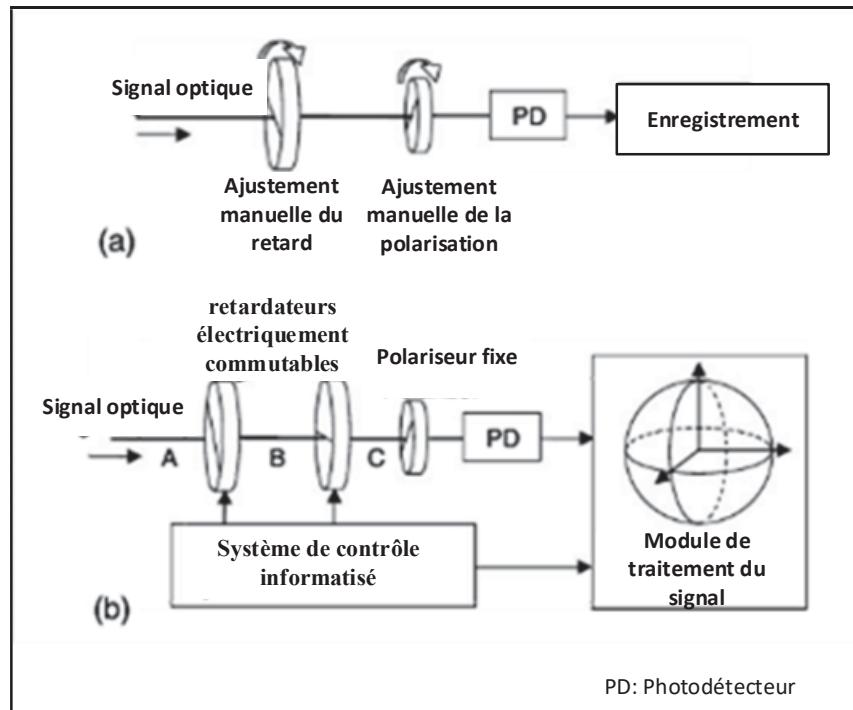


Figure 1.8 Schéma général d'un polarimètre à détection séquentielle  
Adaptée de Hui et al. (2009, p.195)

#### 1.4.1.4 Revue des expériences de monitoring avec un polarimètre

Le tableau ci-dessous résume les expériences de monitoring qui ont été réalisées avec un polarimètre.

Tableau 1.1 Récapitulatif des expériences de monitoring avec un polarimètre

Référence	Type de lien	Durée	Objectif	Contributions
Waddy et al. (2001)	Liaison aérienne de 34 km.	5 jours	Trouver les raisons des effets rapides de polarisation.	Différentes activités en polarisation sont corrélées aux variations des températures et aux vitesses des vents.
Peterson et al. (2004)	Lien enterré de 110 km.	La durée n'est pas clairement définie. variant de quelques heures à plusieurs jours.	Caractériser l'évolution des effets de polarisation (DGD, SOPMD, SOP). Tester les performances d'un compensateur de dispersion.	L'évolution temporelle de la DGD et SOP. L'histogramme de SOP qui peut être ajusté par la fonction de densité de Rayleigh. L'observation de <i>glitch</i> dans les mesures.
Bao et al. (2004)	Liaison aérienne de 34 km et liaison enterrée de 52 km.	5 jours	Trouver les raisons des effets rapides de polarisation. Idem à Waddy et al. (2001)	Fluctuations de la polarisation sont dues au vent, aux variations entre le jour et la nuit.
Boroditsky et al. (2005)	Liaison en ville de 40 km. Et une liaison en banlieue de 7 km	6 mois	Montrer les différents types d'événements Transitoires.	Les variations rapides de polarisation sont élastiques. Nouvelle métrique pour l'activité polarisation.

Tableau 1.2 Récapitulatif des expériences de monitoring avec un polarimètre (suite)  
Adapté de Crawford (2014)

Référence	Type de lien	Durée	Objectif	Contributions
Waddy et al. (2005)	Liaison aérienne de 80 km composée de 50 km dans la direction Nord-Sud et de 30 km dans la direction Est-Ouest.	Pas clairement définie.	Les temps de corrélation des valeurs de DGD et des valeurs de PDL sont de l'ordre des secondes.	Première étude de la PDL sur lien aérien.  Fonction d'autocorrélation normalisée de DGD et PDL.  Fluctuation de DGD et PDL plus élevé sur les liaisons aériennes.
Matsuda et al. (2009)	Signal optique RZ-DQPSK à 43 Gbit/s sur une liaison aérienne de 133.6 km (Soit 4 spans de 33.4km).	75 jours	Caractériser les fluctuations de l'état de polarisation.	L'histogramme des fluctuations des états de polarisation mesurés avec un polarimètre peut être ajusté par la fonction de densité de Rayleigh.
Nelson et al. (2011)	Liaison optique WDM enterrée de 2 fibres de 900 km en boucle.	79 jours sur 4 mois.	Valeurs typiques de la vitesse maximale des effets de polarisation.	Les effets transitoires les plus rapides sont élastiques ( $< 11^\circ$ ).

Il a été mené très peu de mesures sur un long terme des fluctuations des états de polarisation dans les liaisons optiques avec un polarimètre. Ces expériences de monitoring démontrent que l'état de polarisation varie avec la température, le vent et qu'il existe une différence de variation de SOP(State of Polarization) entre le jour et la nuit. L'histogramme de l'état de polarisation suit une distribution de Rayleigh. Les plus rapides fluctuations de l'état de polarisation sont élastiques. Et les fluctuations de la DGD et PDL sont plus élevé sur les liaisons aériennes.

#### **1.4.2 Monitoring avec un transpondeur cohérent**

Cette partie présente le transpondeur cohérent et les expériences réalisées avec ce type d'équipement.

##### **1.4.2.1 Transpondeur cohérent**

Dans cette section, nous présentons le transpondeur cohérent en définissant en premier lieu la détection cohérente. En second lieu, nous faisons une présentation de l'architecture du transpondeur, son module de traitement et l'algorithme utilisé pour les estimations des paramètres du signal reçu.

##### **La détection cohérente**

La détection cohérente, à la différence de la détection directe, nous permet d'avoir l'information complète sur le signal optique. Par la détection cohérente, nous avons accès à l'amplitude, la phase, et la polarisation du signal. L'accès à ces paramètres offre de multiples possibilités : l'augmentation de la capacité binaire des canaux de transmission par l'usage de formats de modulations avancés basés sur la modulation de phase et le multiplexage en polarisation; l'usage de techniques de compensation électronique du signal.

La détection cohérente est basée sur le mélange du signal des données transmis avec un autre signal émis par un oscillateur local (*Local Oscillator*, LO). Le mélange est assuré par un coupleur hybride de 3 dB qui ajoute un déphasage de 180° à l'un ou l'autre signal (Chan, 2010) et les divise en deux parties égales qui seront détectées par deux photodétecteurs (voir

Figure 1.9). Lorsque la fréquence du LO est proche de celle du signal de donnée on parlera de récepteur homodyne sinon de récepteur hétérodyne. Les deux types de récepteurs utilisent un contrôleur de polarisation pour aligner la polarisation du LO et celle du signal, et ils ont la même sensibilité OSNR (Chan, 2010). La différence entre ces deux types de récepteurs se situe au niveau de leurs composants (Chan, 2010).

Il existe deux différentes configurations des récepteurs cohérents :

- **Récepteur cohérent avec détecteur balancé** (voir Figure 1.9)

Dans ce type de configuration, le contrôle de la polarisation est assuré par un contrôleur de polarisation.

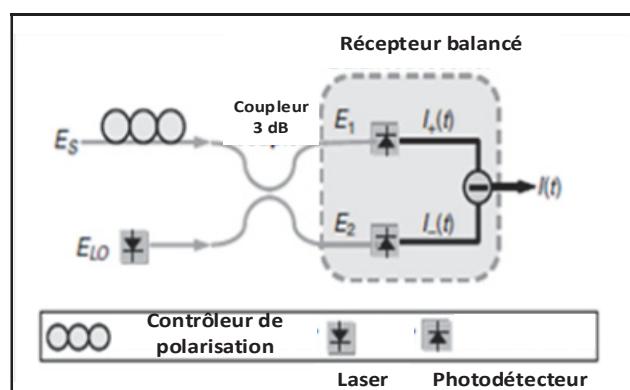


Figure 1.9 Schéma d'un récepteur cohérent avec détecteur balancé  
Tirée de Chan (2010)

- **Récepteur à diversité de phase et de polarisation** (voir Figure 1.10)

Dans ce type de configuration, le contrôle de la polarisation est assuré par le module DSP.

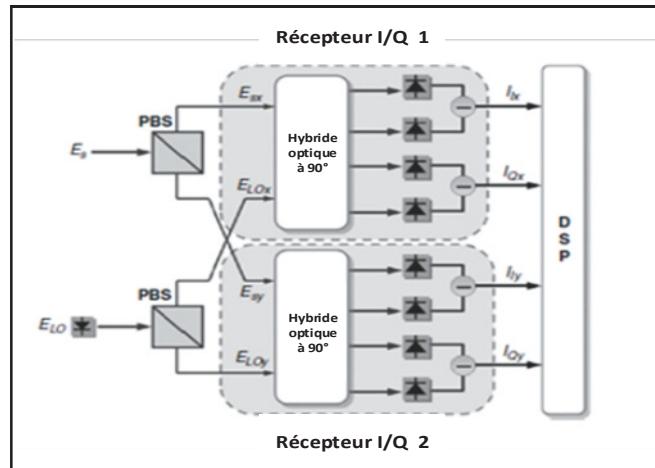


Figure 1.10 Schéma d'un récepteur cohérent  
à diversité de phase et de polarisation  
Tirée de Chan (2010)

#### 1.4.2.2 Architecture du transpondeur cohérent

Le transpondeur cohérent est composé d'un transmetteur et d'un récepteur, comme indiqué dans la figure 1.11. Le transmetteur a pour rôle principal de moduler les signaux optiques de donnée et de les transmettre sur le canal optique. Le récepteur a pour rôle principal de détecter les signaux de données et de les démoduler.

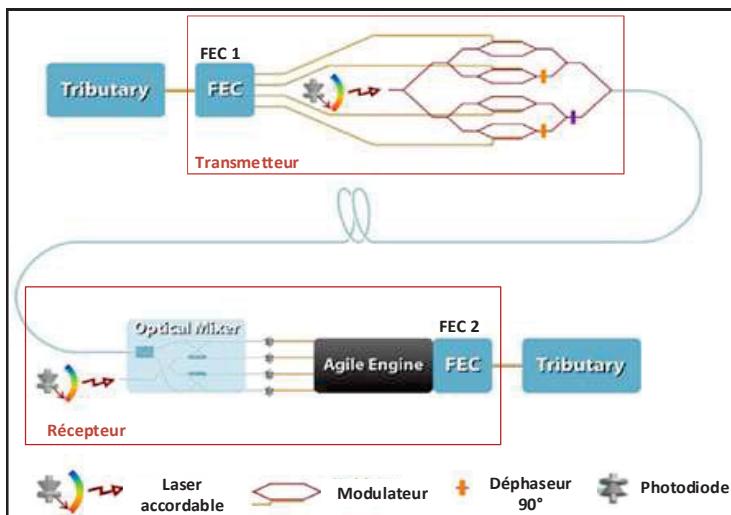


Figure 1.11 Diagramme du transpondeur cohérent  
Adaptée de Roberts et al. (2009)

Au niveau du transmetteur, les signaux de données arrivent au FEC1. Le FEC1 assure le multiplexage et la pré-codage des signaux de données. Ensuite, ces signaux analogiques sont modulés avec la lumière du laser accordable selon le format de modulation. Pour le format de modulation DP-QPSK les signaux sont modulés en phase (I) et en quadrature (Hui et O'Sullivan) dans chacune des polarisations X et Y. La figure 3.6 ci-dessous, présente l'architecture d'un transmetteur cohérent DP-QPSK.

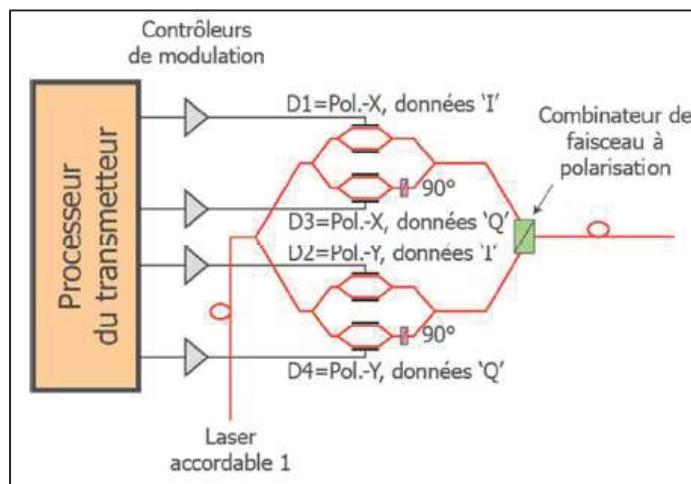


Figure 1.12 Architecture d'un transmetteur cohérent DP-QPSK  
Adaptée de Nelson et al.(2009)

Au niveau du récepteur, le diviseur de mode de polarisation (*Polarization Beam Splitter*, PB) divise le signal suivant les polarisations X et Y. Ensuite, l'hybride optique à  $90^\circ$  mélange la lumière laser de l'oscillateur local à chacun des signaux. L'hybride optique à  $90^\circ$  est composé de coupleurs et de déphasateurs. Notons que le récepteur cohérent DP-QPSK est un récepteur homodyne donc la fréquence du laser de l'oscillateur local est réglée très proche de celle du signal optique transmis. Enfin les signaux optiques sont transmis à quatre photodiodes. Ces photodiodes assurent la conversion des signaux optiques en des signaux électriques.

Une fois dans le domaine électrique la suite du traitement est assurée par le module de traitement de signal DSP. Et le FEC 2 (sur la Figure 1.11) assure la correction des erreurs binaires. La Figure 1.13 ci-dessous, présente l'architecture d'un récepteur cohérent.

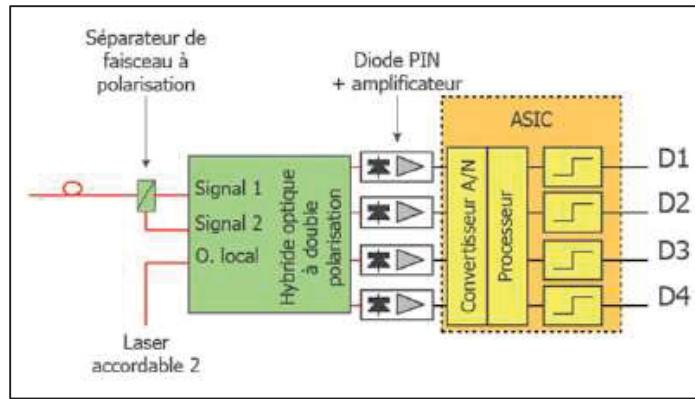


Figure 1.13 Architecture du récepteur cohérent  
Adaptée de Nelson et al. 2009

Le module DSP est présenté sous forme de diagramme à la Figure 1.14.

Ses fonctions sont les suivantes (Roberts et al., 2009) :

- conversion des signaux analogiques en signaux numériques;
- compensation des effets linéaires (dispersion chromatique et PMD/PDL);
- resynchronisation de l'horloge.

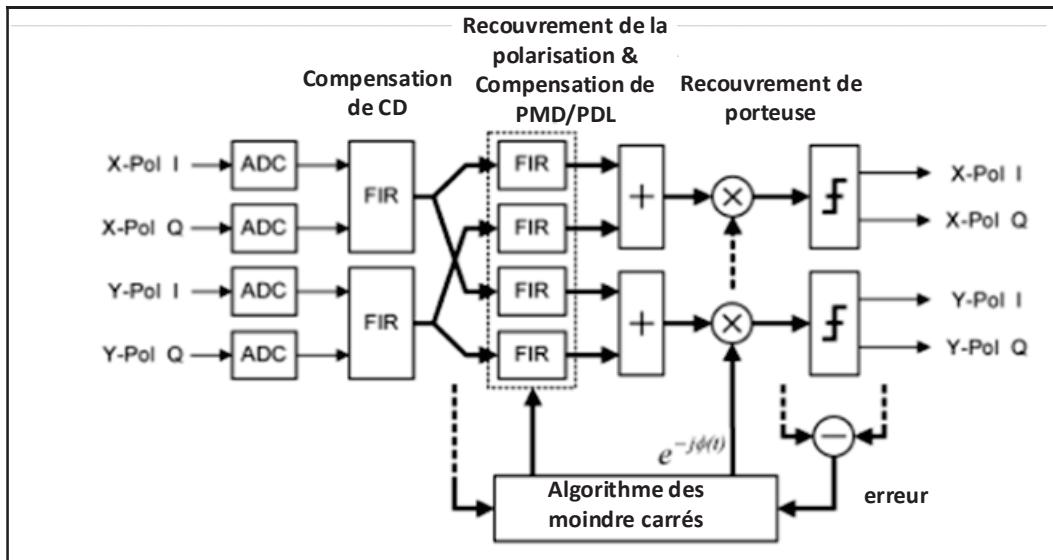


Figure 1.14 Diagramme du processus de traitement de signal optique reçu au niveau du récepteur cohérent à 40 Gbit/s  
Adaptée de Roberts et al. (2009)

### 1.4.2.3 Estimations des paramètres du signal et algorithme des moindres carrés

Dans cette section, est présenté le mécanisme général d'estimations des paramètres du signal optique par l'algorithme des moindres carrés.

Le module DSP du récepteur cohérent utilise plusieurs blocs de filtre à réponse impulsionale (*Finite Impulse Response*, FIR) pour obtenir les estimations des paramètres du signal optique reçu pour assurer sa fonction de compensation. Pour obtenir les bonnes estimations, le module DSP doit déterminer les coefficients adéquats des filtres. Ces coefficients des filtres FIR doivent établir un rapport avec l'inverse de la réponse d'impulsion du canal (Hauske et al., 2008).

La conception des filtres FIR est basée sur la théorie de Wiener. Cette théorie permet de minimiser l'erreur  $e(k)$ , qui est l'erreur d'estimation du filtre à un instant  $k$  (Benvenuto et Cherubini ,2005). La formule de l'erreur  $e(k)$  est donnée dans l'équation (1.9).

$$e(k) = d(k) - y(k) \quad (1.9)$$

Où  $d(k)$  est le signal désiré sortant du filtre et  $y(k)$  le signal sortant du filtre.

La formule de  $y(k)$  est donnée par l'équation (1.10).

$$y(k) = \sum_{n=0}^{N-1} C_n x(k-n) \quad (1.10)$$

Où  $C$  est le vecteur des coefficients du filtre et  $x$  vecteur du signal à l'entrée du filtre.

Pour minimiser cette erreur, les coefficients du filtre sont déterminés par le critère d'erreur minimum de moyenne carrée (*Minimum Mean Square Error*, MMSE). Cependant, ce critère est difficile, car requiert une matrice d'autocorrélation  $R$  du filtre et une corrélation croisée  $p$  entre la sortie désirée et le vecteur entrant (Benvenuto et Cherubini ,2005).

Des algorithmes fournissent une approximation de la théorie de Wiener. Les plus utilisés sont l'algorithme à module constant (*Constant Modulus Algorithm*, CMA) et l'algorithme de moindres carrées (*Least Mean Square*, LMS). Il est implémenté avec un calcul peu complexe

qui fournit une approximation optimale de la théorie de Wiener sans besoin des corrélations complexes R et P (Benvenuto et Cherubini ,2005).

Dans le cas de l'algorithme LMS, le vecteur des coefficients du filtre est mis à jour à chaque itération selon l'équation (1.11) et fonctionne selon le diagramme de la figure 1.15.

$$C(k+1) = C(k) + \mu e(k)x(k) \quad (1.11)$$

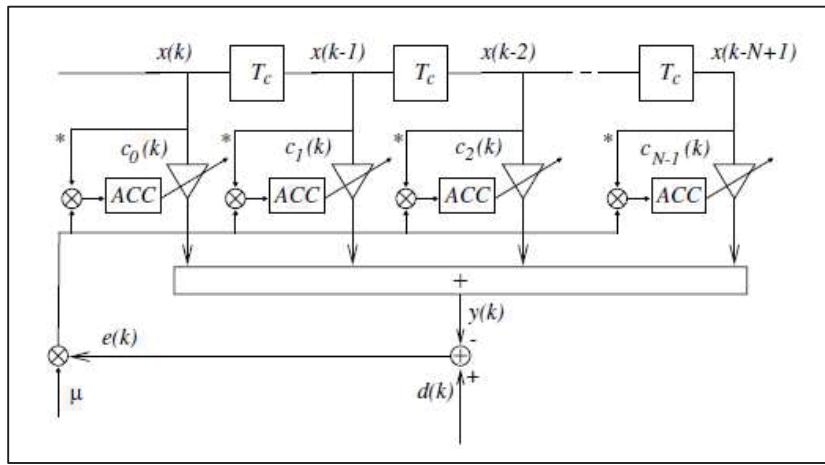


Figure 1.15 Diagramme de fonctionnement de l'algorithme LMS  
Tirée de Benvenuto et Cherubini (2005, p.174)

Les accumulateurs ACC sont utilisés pour mémoriser les coefficients.

#### Les paramètres de l'algorithme LMS sont :

- $N$ , le nombre de coefficients du filtre;
- $0 < \mu < \frac{2}{\text{variance du vecteur du signal entrant } x}$ . (1.12)

La variance la plus utilisée du vecteur du signal entrant est sa puissance.

#### Les conditions de convergence de l'algorithme LMS sont :

- les coefficients du filtre doivent converger vers la solution de la théorie de Wiener;
- et l'erreur d'estimation  $e(k)$  doit tendre vers zéro.

#### 1.4.2.4 Revue des expériences de monitoring avec un transpondeur cohérent

Le tableau ci-dessous résume les expériences de monitoring qui ont été réalisées avec un transpondeur cohérent.

Tableau 1.3 Récapitulatif des expériences de monitoring avec un transpondeur cohérent  
Adapté de Crawford (2014)

Référence	Type de lien	Durée	Objectif	Contributions
(Roberts et al., 2009)	N/A	N/A	Démontrer la performance des modules de DSP des récepteurs cohérents.	Les récepteurs cohérents sont habilités à faire du monitoring.
Woodward <i>et al.</i> (2012)	Trois liaisons optiques enterrées de longueurs 30 km, 75 km et 273 km.	500 heures	Observation de : SOP, DGD, PDL, BER.	Aperçu des différentes activités en polarisation en fonction de la structure du lien optique cohérent.
Woodward <i>et al.</i> (2014)	Les mêmes liaisons que Woodward <i>et al.</i> (2012)	Plus de 10 000 heures sur 18 mois.	Observation de : SOP, DGD, PDL, BER.	La fonction de densité de Maxwell ajuste avec précision l'histogramme des valeurs de DGD moyenné à la minute.  Temps de corrélation des valeurs DGD est entre 1.3 et 4.1 jours et celui de S <sub>1</sub> s'étend de 0.18 à 1.7 jours.

Ces travaux de monitoring démontrent l'habileté des transpondeurs cohérents à faire du monitoring. L'activité en polarisation dans une fibre optique donnée change selon les conditions de déploiement. Et l'histogramme des valeurs de la DGD suit une distribution de maxwell.

#### **1.4.3 Revue des expériences de mesures sur les effets transitoires de polarisation**

Les variations de la polarisation du signal sont à surveiller dans les systèmes de transmission cohérents. En effet, des variations rapides du SOP pourraient causer des interruptions de service des équipements si le récepteur n'est pas capable de suivre les changements de l'état de polarisation. Depuis les années 1990, des études de caractérisation des variations de la polarisation en général et des variations rapides en particulier ont été menées. Ces études ont pour but de mieux comprendre la variation de la polarisation et ses sources et de mesurer les déflections angulaires du SOP lors de ces variations rapides. Ces études peuvent se classer en deux grands groupes : les études théoriques et expérimentales et les études sur des liaisons optiques commerciales.

##### **1.4.3.1 Études théoriques et expérimentales des effets transitoires de polarisation**

L'étude de Kurono et al. (1996) est l'une des premières études sur les effets de polarisation donnant un excellent aperçu des futurs problèmes des systèmes optiques cohérents qu'engendreraient les effets transitoires de polarisation. L'étude a été effectuée sur le plan théorique et expérimental ainsi qu'avec des mesures sur le terrain. Théoriquement, une explication de la source des effets transitoires de polarisation dans un câble de garde à fibres optiques (*Optical Ground Wire*, OPGW) a été exposée. En effet, ce câble est un câble torsadé dans lequel le courant circule en spirale. Il n'existe aucune isolation électrique entre les éléments conducteurs du câble. Par ce manque d'isolation, le courant présent, induit un champ magnétique qui provoque un effet Faraday qui influence la propagation de la lumière. L'effet Faraday est donc à l'origine du mécanisme de variation de l'état polarisation de la lumière dans les câbles OPGW. Pour la partie expérimentale, l'outil utilisé est un analyseur de vecteur de Stokes en temps réel avec une bande passante de 10 MHz pour mesurer les variations de l'état

de polarisation sur un câble OPGW de 200 m dans des conditions de foudre. Les conditions de foudre ont été simulées en appliquant une tension sur le câble par l'usage d'un générateur de courant. L'architecture de leur analyseur est la même qu'un polarimètre à détection parallèle. La défexion angulaire maximale mesurée est de 70° avec un temps de montée de 15 µs (temps entre le niveau initial du SOP et son niveau maximum). Ce temps de montée est plus long que celui du courant appliqué qui est de 1µs. Ensuite, par calcul, l'étude a pu montrer que ce temps de montée est fonction de la structure du OPGW et est limité par celui du courant circulant en spirale qui est de 20 µs. Par ailleurs, les mesures sur terrain ont été menées sur un câble OPGW de 40 km. Une corrélation a été observée entre les périodes de foudre enregistrées par la compagnie d'électricité et ceux des variations de l'état de polarisation. 51 évènements de foudre ont été observés sur 2 mois. Et les évènements de foudre enregistrées dans un rayon de 60 km ont affecté la variation de SOP. Les temps de montée sont entre 50 et 200 µs et ces variations durent de 2 à 5 ms. Ces temps de montée comme observés expérimentalement sont plus longs que celui du courant causant les variations de l'état de polarisation. En effet, 50% des courants produits par la foudre avaient des temps de montée sous les 40 µs.

Une autre étude toujours sur l'effet de la foudre sur la polarisation du signal optique a été menée par Pietralunga et al. en 2004. Leurs expériences ont été menées sur trois types de câbles optiques aériens dans un environnement de laboratoire. L'évolution de la polarisation a été suivie en utilisant un polarimètre à détection parallèle. Leur étude expérimentale a pu prouver que les évènements de foudre correspondent aux extrêmes variations de polarisation dans les fibres aériennes. Ces extrêmes variations de la polarisation couvrent une période de l'ordre des millisecondes. Et ils ont pu observer, au vu de la qualité du signal (BER), que les systèmes optiques WDM NRZ à 10 Gbit/s étaient insensibles aux effets de la foudre. Cependant, la foudre cause une variation de l'état de polarisation par l'effet Faraday, mais pas de biréfringence ni de dépolarisation causée par l'effet Kerr.

Paolone et al. (2005) quant à eux ont réalisé une étude expérimentale simulant la foudre par décharge de courant sur un câble électrique enterré. Par l'observation des temps de réponse causés par la foudre sur des câbles électriques enterrés, ils ont prouvé par calcul une corrélation

entre le temps de réponse lors de la foudre et le temps de montée des événements transitoires de polarisation. Ce qui vient en appui aux observations de (Kurono et al., 1996) sur les câbles OPGW.

Le sujet a aussi été étudié par Sokolov (2007) sur les câbles fibre optique enterrés à structure non métallique. L'étude a montré des variations de la PMD causées par l'effet Kerr lors des événements de foudres. Le même auteur a approfondi le sujet dans (Sokolov, 2009) en décrivant comment la polarisation des signaux optiques varie par l'effet de Kerr en présence d'un champ électrique et par l'effet Faraday en présence d'un champ magnétique toujours sur les fibres optiques enterrées.

En 2012, une évaluation de l'influence d'un champ électromagnétique externe sur les systèmes WDM de 10Gbi/s à 40Gbit/s sous deux formats de modulations (modulation d'amplitude NRZ et modulation en polarisation) a été proposée dans l'étude théorique de Supe et Porins (2012). À l'aide d'un logiciel de simulation, une simulation des effets Kerr et Faraday a été appliquée sur un système WDM à 40 canaux à débit accordable (10 Gbit/s 12.5 Gbit/s et 40 Gbit/s). Pour simuler l'effet Kerr, une augmentation de la valeur de la PMD de la fibre a été faite. Pour simuler l'effet Faraday, une insertion d'un *Optical signal polarization rotator* a été placé à la sortie de la fibre. Les résultats ont montré qu'un champ électromagnétique externe fait chuter le niveau de BER en présence de l'effet Kerr et/ou l'effet Faraday et que les formats de modulation jouant sur la polarisation sont plus sensibles que les formats de modulation d'amplitude.

#### **1.4.3.2 Étude des effets transitoires de polarisation sur des liaisons commerciales**

D'autres études ont été menées sur des liaisons commerciales pour avoir un meilleur aperçu des fluctuations de la polarisation sur des liaisons optiques installées.

Kurono et al. (1999) a mené une étude de monitoring sur un câble OPGW pendant 2 mois et demi. Dans des conditions normales (sans foudre), le maximum de l'angle de déflexion est de

40° et une fréquence de variation de la polarisation de 60 Hz a été mesurée soit la même que celle du système de transmission électrique. La plus rapide variation observée en présence de foudre a été de 165° soit presque l'état de polarisation opposé. L'étude a aussi pu établir que dans un rayon de 60 km un coup de foudre peut engendrer une variation de l'état de polarisation d'un câble OPGW. Et plus la foudre est proche, plus grande est la variation de l'état polarisation.

Une étude de (S.Waddy et al., 2001) a fait ressortir des corrélations entre les variations de l'état de polarisation de 2 fibres dans un même câble aérien Corning SMF-28<sup>TM</sup> de 34 km et différentes conditions de la météo (température, vent, saison, etc.). Les expériences ont été menées pendant 6 jours pour l'un et 10 jours pour l'autre. Les mesures des effets transitoires de polarisation ont été réalisées avec un polarimètre Agilent (modèle et fréquence d'opération non précisés). Plus de variations ont été observées pendant la journée, dues selon les auteurs au réchauffement du câble par le soleil et le vent causant une pression sur le câble. Ils ont conclu qu'un évènement de polarisation rapide pourrait arriver lors de grandes variations de température et d'évènements météorologiques extrêmes tels que les orages et les violentes tempêtes de neige. Malheureusement, aucun évènement de polarisation rapide n'a été enregistré pendant de leur étude.

Une autre étude, celle de (Peterson et al. 2002) a porté à la fois sur les liaisons optiques enterrées et aériennes comportant des modules de compensation optique de dispersion. Cette étude donne une idée de l'évolution temporelle de l'état de polarisation de ces différents liens. Les mesures ont été réalisées à l'aide d'un polarimètre opérant à une de fréquence de 4 kHz. Afin de caractériser les variations de l'état de polarisation, les auteurs ont réalisés un histogramme des vitesses de rotation maximales du vecteur de Stokes. L'histogramme obtenu suit une loi de probabilité de Rayleigh pour les liaisons enterrées. Mais pour les liaisons aériennes OPGW, l'histogramme ne suit pas uniquement la loi de Rayleigh (Peterson, Leo et Rochford, 2004).

Les expériences de (Bao, Waddy et Chen, 2004) ainsi que (Leeson, Bao et côté, 2009) ont confirmé les corrélations entre les éléments de la météo ou l'environnement naturel (température, vent, jour/nuit, saison) et la variation de la polarisation du signal optique transmis sur les liaisons optiques aériennes incluant les câbles OPGW.

Une analyse a été proposée par Boroditsky et al., (2005) sur les fluctuations de la polarisation dans deux systèmes optiques WDM à 10 Gbit/s, opérant l'un en banlieue (40 km) et l'autre en zone urbaine (7 km). Les mesures des effets transitoires de polarisation ont été réalisées pendant 6 mois avec un polarimètre de haute résolution (*adaptif PHOTONICS A1000*) déclenché (Seuil de déclenchement de 5° dans un temps de 10 ms). Différentes catégories de variations de la polarisation ont été définies par les auteurs : les effets transitoires rapides élastiques ; les effets lents élastiques et lents inélastiques. L'observation majeure est que toutes les variations rapides de polarisation sont élastiques. Ces variations ne devraient pas engendrer des pannes de service, mais pourraient affecter la performance des équipements dotés de modules de suivi non rapide de polarisation, car trop lents. Il faut aussi noter qu'ils introduisent une nouvelle métrique qui est l'activité de polarisation qui correspond à la longueur de l'arc traçant les variations de l'état de polarisation sur la sphère de Poincaré.

Nelson et al.(2011) ont mesuré pendant 79 jours sur une période de 4 mois une liaison WDM terrestre longue distance de 1800 km (soit 900 km aller-retour). Cette liaison transportait des signaux 10 Gbit/s NRZ et est composée de fibre de compensation de dispersion (*Dispersion Compensating Fiber*, DCF), des amplificateurs EDFA et des ROADM. Le monitoring est effectué à l'aide d'un polarimètre rapide Agilent N7781B opérant à une fréquence de 5 kHz. Un total de 515 variations de l'état de polarisation ont été observées avec seulement 8 parmi eux ayant des vitesses angulaires de plus de 10 degrés/ms. Les extrêmes des vitesses angulaires de la polarisation sont de moins de 1 degré/ms pour le plus lent et de 300 degrés/ms pour le plus rapide. Comme cela a été observé dans (Boroditsky et al., 2005), les quatre plus rapides variations de l'état de polarisation observé dans cette étude sont élastiques.

Les études les plus proches de celles menés dans le cadre de notre projet de recherche sont les travaux de Hauske et al. (2008), Woodward et al. (2008), Roberts et al. (2009), et Woodward et al. (2010) ont réalisé des études ayant pour objectifs de vérifier la possibilité d'utiliser des études établissant l'habilité les transpondeurs cohérents pour faire du monitoring. Woodward et al. (2012) fait état d'une étude de monitoring utilisant un transpondeur cohérent de 40 Gbit/s pour effectuer les mesures des paramètres S<sub>1</sub>, DGD et pré-FEC BER. Le lien sous étude est une liaison enterrée sans modules de compensation de dispersion, et les mesures ont été effectuées dans les deux directions Est et Ouest de six fibres installées sur trois chemins de câbles différents. Ils ont approfondi l'étude sur les mêmes liaisons, mais cette fois dans une période de monitoring plus long de 18 mois (Woodward et al. ,2014). Cette étude fait le monitoring de l'activité de polarisation, métrique introduite par (Boroditsky et al., 2005).

#### **1.4.3.3 Quelques chiffres sur les effets transitoires de polarisations**

Dans cette section, il est présenté quelques chiffres sur l'ordre de grandeur des valeurs des effets transitoires de polarisation. Ces valeurs proviennent de (Kuschnerov et Hermann, 2016) et du blogue de New Ridge Technologies (Technologies, 2016). Bien que la méthode d'obtention de ces valeurs n'a pas été définie dans les différents articles, ils fournissent un aperçu de ceux à quoi peut être exposé un transpondeur cohérent.

De façon générale, les effets transitoires de polarisation très rapides génèrent les vitesses angulaires de l'état de polarisation de 100 000 rad/s à 1000 000 rad/s. cependant de telles valeurs n'ont pas encore pu être mesurées expérimentalement à l'aide de transpondeurs cohérents et ou du polarimètre.

Tableau 1.4 Quelques chiffres sur les effets transitoires de polarisation

Type de câble fibre optique	Maximum de la vitesse angulaire de SOP
<b>OPGW</b>	En cas de foudre
	En cas de forte foudre
	Effets de foudre dans les environs
<b>Enterré</b>	20 krad/s
<b>Fibre à compensation de dispersion</b>	300 krad/s

## 1.5 Conclusion

Ce chapitre a présenté une étude bibliographique sur la caractérisation et l'étude théorique et expérimentale des effets dynamiques de polarisation dans les liaisons optiques cohérentes à l'aide de transpondeur cohérent et de polarimètre.

Cette étude nous a permis dans premier temps de connaître les objectifs et défis du monitoring de réseau ainsi que les deux grandes familles de technique de monitoring des liaisons optiques ; ensuite d'approfondir nos connaissances des différents paramètres de performance d'une liaison optique, dont le monitoring est essentiel. Et enfin de faire une revue des expériences de monitoring passées permettant de mieux positionner notre projet de recherche.

Les expériences rapportées dans la littérature couvrent les liaisons aériennes et enterrées. Elles ont été menées tant expérimentalement que sur des liaisons commerciales. Ces études ont prouvé que les effets de transitoires de polarisation dans une liaison optique sont inhérents à son environnement immédiat, à la structure du câble fibre optique et celui du réseau ainsi que son débit. Par ailleurs, les effets Faraday et Kerr prouvés à l'origine de ces effets de polarisations sont indépendants.

À ce jour, la foudre est la cause des variations les plus grandes et rapides de la polarisation. De façon générale, les différents résultats de ces expériences de monitoring sont présentés sous forme d'histogrammes, de graphe d'évolution temporelle, de graphe de fonction d'autocorrélation et de corrélation.

La revue de littérature montre qu'il existe très peu de données de monitoring recueillies sur de très longues périodes (plusieurs saisons par exemple) ou encore dans différents types de liens (aériens ou enfouis).



## **CHAPITRE 2**

### **MONITORING DE DEUX LIAISONS COHÉRENTES AVEC UN POLARIMÈTRE : ANALYSE STATISTIQUE**

#### **2.1 Introduction**

Dans ce chapitre sont présentés les résultats de deux expériences de monitoring qui ont été menées sur deux liaisons optiques cohérentes. En première partie, une nouvelle analyse des événements de polarisation observés sur une liaison aérienne à 40 Gbit/s est présentée avec un nouveau seuil de détection des évènements de 1,27 rad/ms. En deuxième partie, une analyse des mesures effectuées avec un polarimètre dans le cadre d'une expérience de monitoring menée sur une liaison optique enfouie à 100 Gbit/s est présentée.

#### **2.2 Analyse des mesures du polarimètre sur une liaison cohérente 40 Gbit/s**

##### **2.2.1 Présentation de la liaison aérienne à 40Gbit/s**

Dans cette section, les résultats d'analyse des données de monitoring d'une liaison optique aérienne du réseau d'un fournisseur de services nord-américain sont présentés. Cette liaison a été monitorée à l'aide d'un transpondeur cohérent 40G DP-QPSK et d'un polarimètre de octobre 2012 à octobre 2014. Dans cette section, seulement les données issues du polarimètre sont analysées. Le montage expérimental est présenté à la Figure 2.1.

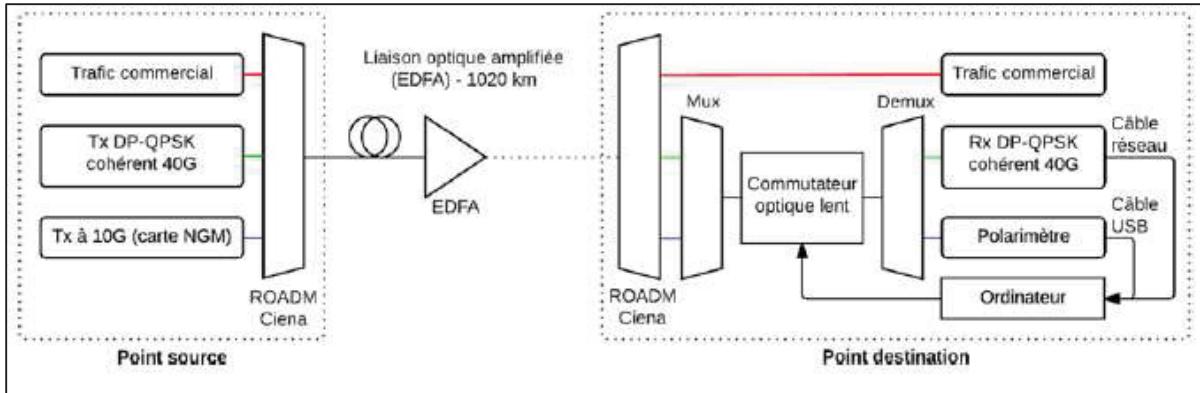


Figure 2.1 Schéma du montage expérimental utilisé pour le monitoring de la liaison optique aérienne à 40 Gbit/s  
Tirée de Brugière (2015)

Le montage expérimental comprend les éléments suivants :

- une liaison aérienne commerciale du réseau d'un fournisseur de services nord-américain, située sur la côte Ouest des États-Unis, d'une longueur totale de 1020 km, dont 750 km de liaison aérienne OPGW et 270 km de liaison enterrée près d'un chemin de fer;
- une liaison optique constituée de 14 sections de fibre optique monomode G.652 (avec un coefficient d'atténuation de 0,2 dB/km, un coefficient de dispersion de 17 ps/nm.km et un coefficient de PMD de 0,2 ps/ $\sqrt{\text{km}}$ );
- un site ROADM à chaque extrémité et des sites intermédiaires d'amplification à l'erbium EDFA sans compensation optique de dispersion;
- un transpondeur cohérent DP-QPSK à 40 Gbit/s de la plateforme 6500 de Ciena avec compensateur électronique de dispersion;
- un transmetteur optique à 10 Gbit/s utilisé comme source de signal optique polarisé linéairement pour le polarimètre;
- un polarimètre Agilent N7786B.

## 2.2.2 Présentation du polarimètre utilisé : Agilent N7786B

Le monitoring des états de polarisation de la liaison aérienne a été effectué par deux moyens : un polarimètre installé au point de destination (voir Figure 2.1) et un transpondeur cohérent à 40 Gbit/s. Le polarimètre utilisé a été le synthétiseur de polarisation Agilent N7786B. Il s'agit

d'un polarimètre relativement rapide doté d'une fréquence d'acquisition de 20 kHz, soit un échantillon de mesure à chaque  $50\mu\text{s}$ . L'architecture de ce polarimètre est présentée à la Figure 2.2.

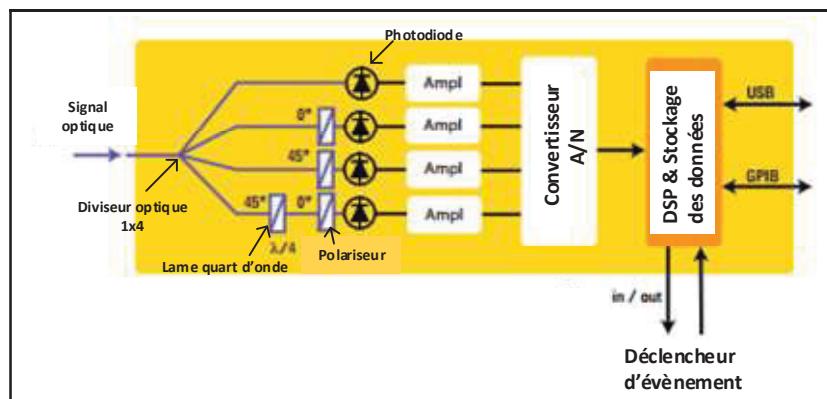


Figure 2.2 Architecture du synthétiseur de polarisation d'Agilent  
Adaptée de Agilent Technologies ( 2008b)

Comme l'indique la Figure 2.2, ce polarimètre fonctionne à détection parallèle (description de ce fonctionnement à la sous-section 1.4.1.2). Les deux modes d'acquisition de mesure de ce polarimètre sont :

- en mode autonome ou continu : toutes les mesures des vecteurs de Stokes sont effectuées et ceux sur de longues périodes (plusieurs jours, mois);
- en mode déclenché : les mesures des vecteurs de Stokes sont effectuées à partir d'un seuil prédéfini de changement d'état de polarisation.

### 2.2.3 Acquisition et traitement des données

#### 2.2.3.1 Processus d'acquisition des données

Le mode d'acquisition choisi a été l'acquisition continue. Le processus d'acquisition des données est paramétré à partir d'un PC connecté au polarimètre par câble USB. Ce processus d'acquisition peut être décrit en deux étapes.

## **Étape 1: Mesures des paramètres**

Le polarimètre mesure pendant maximum 10 s un certain nombre de paramètres avec un taux d'échantillonnage de 20 kHz (soit une mesure à chaque 50 µs). Les paramètres mesurés sont : le degré de polarisation et la puissance du signal optique, ainsi que les paramètres de Stokes ( $S_1, S_2, S_3$ ).

## **Étape 2 : Stockage des mesures**

Après 10 secondes de mesure des paramètres, les mesures sont enregistrées sous fichier MAT. Chaque fichier MAT est formé de 200 000 points de mesure et est ensuite transféré sur le serveur de stockage.

### **2.2.3.2 Traitement des données issues du polarimètre**

#### **Notion de calcul parallèle**

Vu le grand volume des données à traiter, le temps de traitement a été optimisé par la mise en place d'un processus de calcul parallèle tel qu'initié par Brugiére (2015). Le processus de calcul parallèle est le fait d'exécuter un ensemble de tâches de façon simultanée sur plusieurs unités de calcul. Cela est adéquat aux ordinateurs à microprocesseur multi-cœurs. Par exemple, pour le traitement des données, dans un processus conventionnel, les fichiers de mesure sont traités par une seule unité de calcul, l'un après l'autre suivant les différentes étapes définies à la Figure 2.3. Dans le cas du processus de calcul parallèle, N fichiers seront traités à la fois (simultanément) par N unités de calcul. Le nombre de fichiers traitables à la fois correspond au nombre d'unités de calcul activé.

Le processus conventionnel est le processus de calcul par défaut de MATLAB, alors que le processus de calcul parallèle est possible par la boîte d'outils *Parallel Computing Toolbox*<sup>TM</sup> (PCT). La boîte d'outils PCT permet d'activer les unités de calcul dans le microprocesseur de l'ordinateur et le script *partitionnement\_parallel.m* permet de regrouper en sous-ensembles les fichiers à traiter selon le nombre d'unités de calcul activées. Le script

*partitionnement\_parallel.m* a été développé par Brugière (2015) et est présenté à l'ANNEXE I.

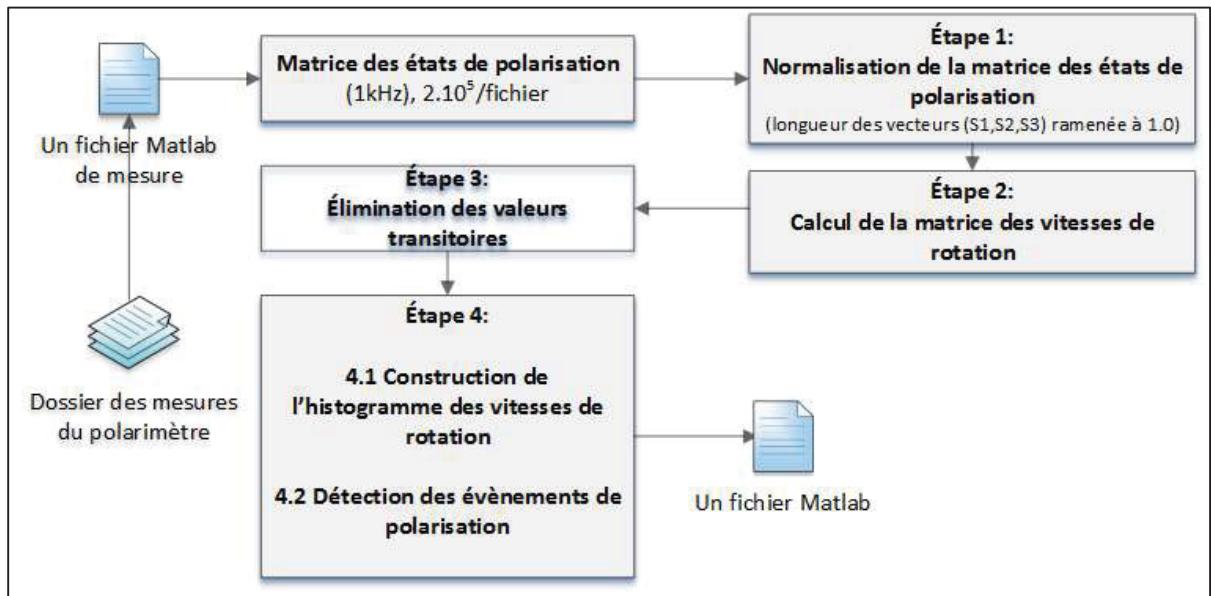


Figure 2.3 Traitement des données du polarimètre

### Fichiers de mesures du polarimètre

Les fichiers de mesures issus du polarimètre sont de type MATLAB et le nom de chaque fichier respecte la nomenclature suivante : Index\_Année\_Mois\_Jour\_Heure\_Minute\_Seconde. Le nom du fichier correspond donc à l'horodatage du fichier de mesure soit la date et l'heure à la seconde près de l'enregistrement du fichier. Chaque fichier de mesure est constitué de 200 000 points de mesures. Les cinq éléments qui constituent un fichier de mesures du polarimètre sont définis ci-dessous et présentés à la Figure 2.4 :

- DOP: vecteur colonne constitué de 200 000 valeurs de DOP capturées par le polarimètre;
- p : vecteur colonne constitué de 200 000 valeurs de puissance optique (exprimées en dBm) capturées par le polarimètre;
- sampling\_rate : valeur exprimée en kHz de la fréquence d'échantillonnage du polarimètre utilisé;
- sop : matrice de 200 000 lignes et 3 colonnes. Les trois colonnes de cette matrice correspondent aux trois paramètres de Stokes (S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub>, S<sub>3</sub>). Cette matrice regroupe donc 200 000 valeurs de chacun des trois paramètres de Stokes capturés à un intervalle de 50 µs;

- `started_at` : horodatage du fichier.

	DOP	200000x1
	p	200000x1
	sampling_rate	1x1
	sop	200000x3
	started_at	1x6

Figure 2.4 Constituants d'un fichier de mesures du polarimètre (40 G)

Suivant la Figure 2.3, les étapes de traitement des données issues du polarimètre peuvent être regroupées en quatre grandes étapes.

### Étape 1 : Normalisation de la matrice des états de polarisation

La première étape du traitement des données issues du polarimètre est la normalisation de la matrice des vecteurs de Stokes (*sop*) de chaque fichier de mesures. La normalisation des vecteurs de Stokes, telle que recommandée par Hui et O'Sullivan (2009), a été effectuée en utilisant l'équation suivante :

$$sop_{norm} = \frac{sop}{\sqrt{s_1^2 + s_2^2 + s_3^2}} \quad (2.1)$$

Suivant l'équation (2.1), la matrice *sop* normalisée *sop<sub>norm</sub>* est obtenue en divisant chaque élément de la matrice *sop* par  $\sqrt{s_1^2 + s_2^2 + s_3^2}$  qui représente la puissance optique totale du signal optique.

### Étape 2 : Formation de la matrice des vitesses de rotation du vecteur de Stokes

La deuxième étape du traitement est le calcul des vitesses de rotation du vecteur de Stokes. La vitesse de rotation du vecteur de Stokes est obtenue par la division de la distance parcourue sur la sphère de Poincaré par le vecteur de Stokes entre deux instants par la valeur  $\Delta t$  du temps écoulé entre ces instants. Cette distance parcourue par le vecteur de Stokes sur la sphère de

Poincaré est appelée déflexion angulaire, tel que vu à la sous-section 1.3.4 et définie par l'équation (1.6). La vitesse de rotation du vecteur de Stokes est obtenue par l'équation suivante :

$$\frac{\gamma(t_1, t_2)}{\Delta t} = \frac{\cos^{-1}[\vec{S}(t_1) \cdot \vec{S}(t_2)]}{t_2 - t_1} \quad (2.2)$$

La fonction MATLAB *pola-angular\_velocity\_matrix.m*, qui permet la formation de la matrice de la rotation du vecteur de Stokes, est présentée à l'ANNEXE II.

### **Étape 3 : Élimination des valeurs transitoires**

La troisième étape du traitement est la suppression des valeurs transitoires de la matrice des vitesses de rotation du vecteur de Stokes. Cette période transitoire subvient au début des mesures du polarimètre et est caractérisée par des valeurs non valides de vitesse de rotation du vecteur de Stokes associées à la lenteur du commutateur optique Brugière (2015) qui fait partie du montage de mesure. Le processus d'élimination des valeurs non valides est le suivant :

- repérage de la valeur maximale dans la matrice de vitesse de rotation obtenue à l'étape 2 (*index\_max*);
- ajout d'une marge de 50 points de mesures à *index\_max*;
- suppression des lignes de 1 à *index\_max+50*.

Le processus d'élimination est intégré au script MATLAB *pola\_processing\_stats.m* présenté à l' ANNEXE III. À la fin de cette étape, une matrice réduite des vitesses de rotation du vecteur de Stokes contenant uniquement des valeurs valides des vitesses de rotation du vecteur de Stokes est obtenue.

### **Étape 4.1 : Construction de l'histogramme des vitesses de rotation du vecteur de Stokes**

L'histogramme des vitesses de rotation du vecteur de Stokes est construit à partir de la matrice de vitesses de rotation du vecteur de Stokes obtenue à l'étape précédente. L'histogramme des vitesses de rotation du vecteur de Stokes, construit en utilisant la fonction MATLAB *histc*,

permet de caractériser les occurrences des valeurs des vitesses de rotation du vecteur de Stokes avec un pas de 0,01 rad/ms. Ensuite, il est normalisé en ramenant les valeurs des occurrences en probabilité suivant la définition d'une densité de probabilité tel que :

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(x)dx = 1 \quad (2.3)$$

### **Étape 4.2 : Détection des événements de polarisation**

Cette dernière étape permet de caractériser les variations rapides de l'état de polarisation, qui ont été désignées par le terme évènement de polarisation. À partir de la matrice des vitesses de rotation obtenue à l'étape 3, les évènements de polarisation sont identifiés comme étant les fluctuations de l'état de polarisation du signal qui dépassent amplitude un certain seuil. La définition de ce seuil a été présentée dans la sous-section suivante 2.2.4.1.

La fonction MATLAB *pola\_compute\_events.m* permet la détection des évènements de polarisation et fournir une matrice regroupant des informations caractérisant chaque évènement. Cette matrice se présente comme une matrice de n lignes et 6 colonnes. Les n lignes correspondent au nombre d'évènements détectés. Les 6 colonnes correspondent dans l'ordre à :

- 1- l'horodatage du fichier de mesure origine de l'évènement;
- 2- indice de début de l'évènement;
- 3- indice de fin de l'évènement;
- 4- valeur maximale de la vitesse de rotation du vecteur de Stokes;
- 5- valeur maximale de la déflexion angulaire;
- 6- valeur de fin de l'évènement de la déflexion angulaire.

## 2.2.4 Analyse des évènements de polarisation mesurés par le polarimètre

### 2.2.4.1 Définition d'un évènement de polarisation et seuil de détection

Dans une liaison optique, plusieurs éléments internes ou externes peuvent entraîner un changement rapide de l'état de polarisation (comme vu dans la sous-section 1.3.5). Un événement de polarisation peut être défini comme un changement d'état de polarisation qui dépasse en amplitude un certain seuil de détection. Ce seuil de détection doit être défini de telle sorte que les évènements identifiés soient dus à des réels effets externes et non au bruit interne de l'instrument de mesure. Afin de définir un seuil adéquat de détection des évènements de polarisation, les trois étapes suivantes ont été effectuées.

#### Étape 1 : Caractérisation du bruit généré par le polarimètre Agilent N7786B

Pour caractériser le bruit du polarimètre, des mesures ont été effectuées dans une configuration dos à dos (*back to back*, B2B), c'est-à-dire en plaçant la source directement devant le polarimètre. Pour cette étude, 200 000 fichiers de mesures de polarimètre, soit  $3,996 \times 10^{10}$  points , comparativement à ce qui avait été fait précédemment dans l'étude de Brugièvre (2015) avec  $9 \times 10^9$  points.

Suivant un traitement des données des mesures du polarimètre identique à ce qui a été fait dans Brugièvre (2015), un histogramme des vitesses de rotation du vecteur de Stokes a été construit. Cet histogramme est présenté à la Figure 2.5.

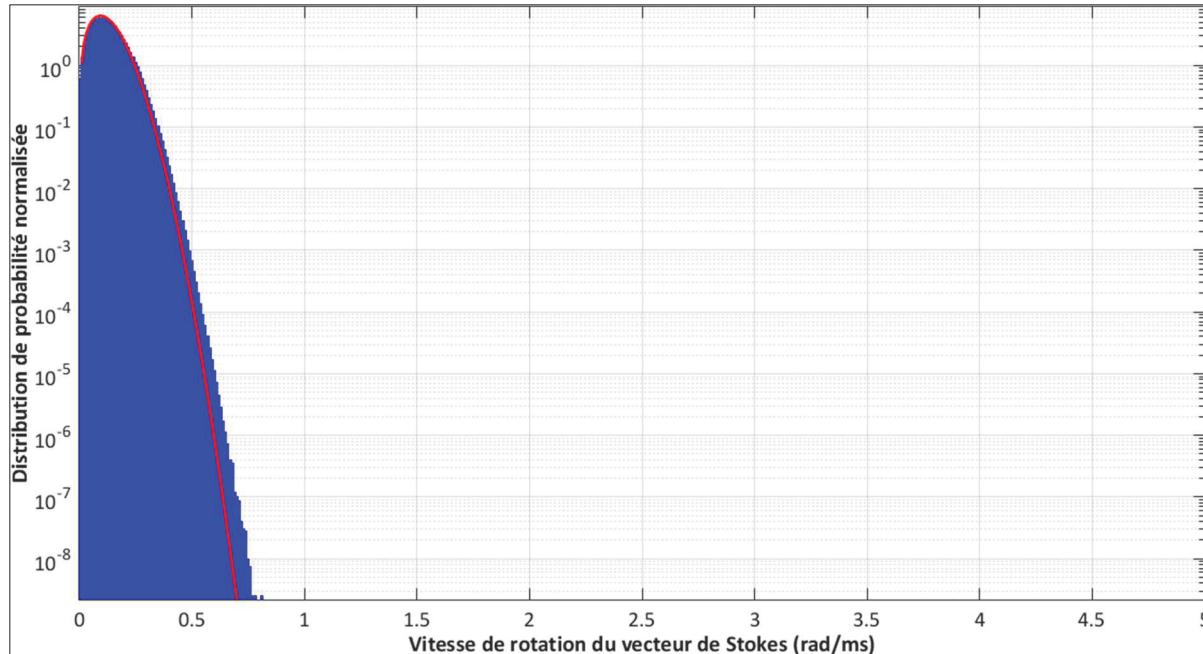


Figure 2.5 Distribution des vitesses de rotation des mesures B2B du polarimètre et ajustement avec une distribution gamma généralisée

La distribution est caractérisée par une moyenne de 0,129 rad/ms et un écart-type de 0,068 rad/ms; ces valeurs correspondent bien à celles de l'histogramme des vitesses de rotation du bruit généré du polarimètre dans l'étude de Brugière (2015). Cette distribution peut être ajustée à une distribution gamma généralisée (représentée par le trait en rouge sur la Figure 2.5), définie par l'équation (2.4):

$$f(x) = \frac{\left(\frac{p}{a^d}\right) x^{d-1} e^{-(x/a)^p}}{\Gamma(d/p)} \quad (2.4)$$

Pour l'ajustement avec la distribution des vitesses de rotation du bruit interne au polarimètre, les paramètres de la distribution gamma généralisée sont :  $(a, d, p) = (0,129; 2,03; 1,89)$ .

## Étape 2 : Ajustement de l'histogramme des vitesses de rotation du vecteur de Stokes par une distribution gamme généralisée

L'histogramme des vitesses de rotation du vecteur de Stokes peut être ajusté par une distribution de gamma généralisée et cela est présenté à la Figure 2.6.

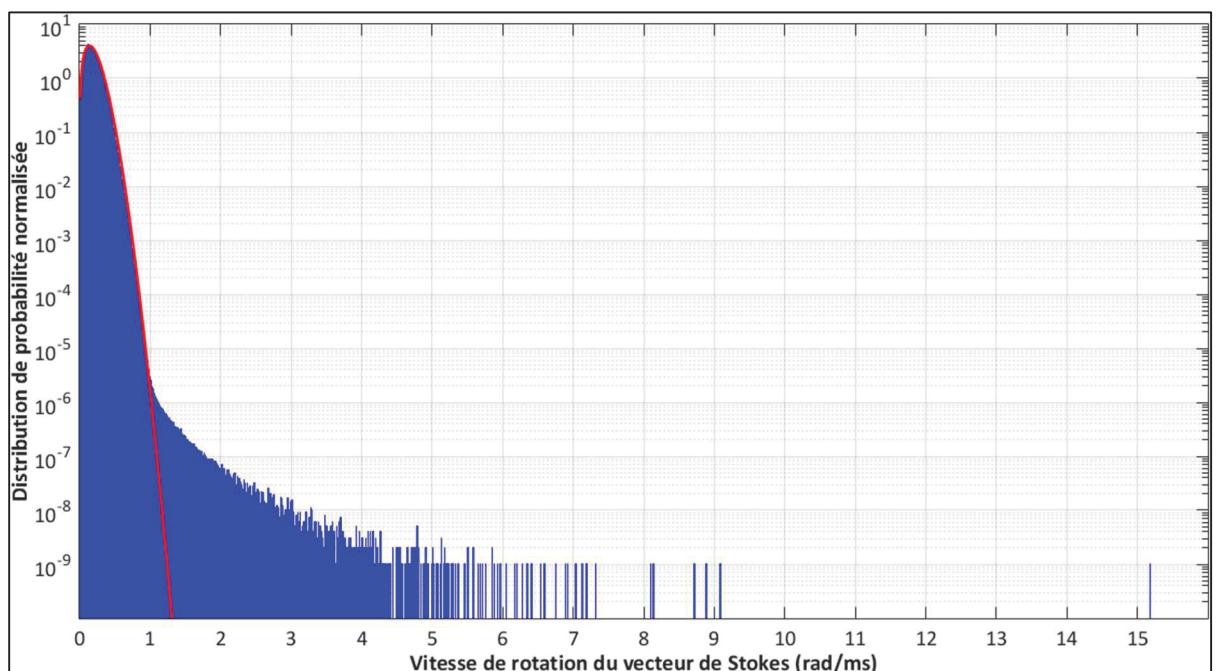


Figure 2.6 Ajustement d'une distribution gamma généralisée sur les vitesses de rotation du vecteur de Stokes de toutes les mesures issues du polarimètre (octobre 2012 à octobre 2014)

La distribution de gamma généralisée ajustée à l'histogramme des vitesses de rotation du vecteur de Stokes a les paramètres  $(a, d, p) = (0,182 ; 2,09 ; 1,68)$ .

## Étape 3 : Détermination du seuil de détection des événements de polarisation

Le seuil de détection des événements de polarisation a été défini au moyen de l'équation :

$$seuil = a \times \left( \frac{1}{\text{gammainc}\left(Pc, \frac{d}{p}\right)} \right)^{1/p} \quad (2.5)$$

où

- la probabilité  $P_c$  d'avoir seulement une seule valeur de vitesse de rotation supérieure au seuil qui pourrait être dû au bruit interne au polarimètre est donnée par l'équation (2.6):

$$P_c = \frac{1}{\text{nombre total de point de mesure}} = \frac{1}{96\,762\,200\,000} \quad (2.6)$$

- $(a, d, p) = (0,182 ; 2,09 ; 1,68)$  sont les paramètres de la distribution gamma généralisée qui correspondent à l'histogramme de vitesse de rotation du vecteur de Stokes de l'ensemble des données.
- gammairc est la fonction gamma incomplète définie par l'équation suivante :

$$\text{gammairc}\left(P_c, \frac{d}{p}\right) = \frac{1}{\Gamma(d/p)} \int_{P_c}^{\infty} e^{-t} t^{(d/p-1)} dt \quad (2.7)$$

L'application numérique de l'équation (2.5) considérant les équations (2.6) et (2.7), donne une valeur du seuil de détection des événements de polarisation égale à 1,27 rad/ms. La valeur de seuil ainsi obtenue est plus élevée que la valeur empirique qui avait été utilisée précédemment (0.9 rad/ms) dans les travaux de Brugière (2015).

#### **2.2.4.2 Analyse hebdomadaire des événements de polarisation**

Le Tableau 2.1 présente les résultats d'une analyse des événements de polarisation détectés sur l'ensemble des données (soit 182 jours sur les 22 mois de monitoring, couvrant la période du 25 octobre 2012 au 06 septembre 2014) en considérant la valeur seuil de 1.27 rad/ms. Au total, 7 537 événements répartis dans 930 fichiers de mesure du polarimètre ont été répertoriés durant cette période.

Tableau 2.1 Statistique journalière des évènements de polarisation

<b>Jour de la semaine</b>	<b>Fichiers de mesure</b>	<b>Fichiers contenant des évènements</b>		
	<b>N</b>	<b>C</b>	<b>ΔC</b>	<b>P</b>
<b>Dimanche</b>	56 549	77	9	0,136
<b>Lundi</b>	57 327	93	10	0,162
<b>Mardi</b>	68 860	114	11	0,166
<b>Mercredi</b>	72 329	143	12	0,198
<b>Jeudi</b>	80 371	237	15	0,295
<b>Vendredi</b>	78 762	161	13	0,204
<b>Samedi</b>	68 872	105	10	0,152
<b>Total</b>	483 070	930	30	1,313

À chaque jour de la semaine, le Tableau 2.1 donne les informations sur :

- **N**, le nombre de fichier de mesure capturé par le polarimètre;
- **C**, le nombre de fichier contenant des évènements;
- **ΔC**, la valeur d'incertitude de C avec  $\Delta C = \sqrt{C}$ ;
- **p**, la fraction de fichier contenant des évènements, avec  $p = C/N$ .

Cette analyse révèle une tendance d'apparition d'évènement de polarisation variant d'un jour à l'autre de la semaine. La probabilité d'avoir un évènement de polarisation a été plus élevée le jeudi ensuite vendredi puis mercredi, mardi, lundi, samedi et dimanche. Au vu de cette tendance, les paramètres extérieurs météorologiques à eux seuls expliqueraient difficilement ces évènements de polarisation. Mais les vibrations sur les installations réseau dues à l'activité humaine seraient une première piste à l'origine de l'apparition plus faible des évènements de polarisation en fin de semaine.

#### 2.2.4.3 Corrélation entre les déflexions angulaires maximales et les vitesses de rotation du vecteur de Stokes maximales observées durant les événements de polarisation

La Figure 2.7 présente l'histogramme 3D des maximums vitesses de rotation du vecteur de Stokes durant les événements de polarisation dépassant le seuil de 1,27rad/ms et les déflexions angulaires maximales correspondants.

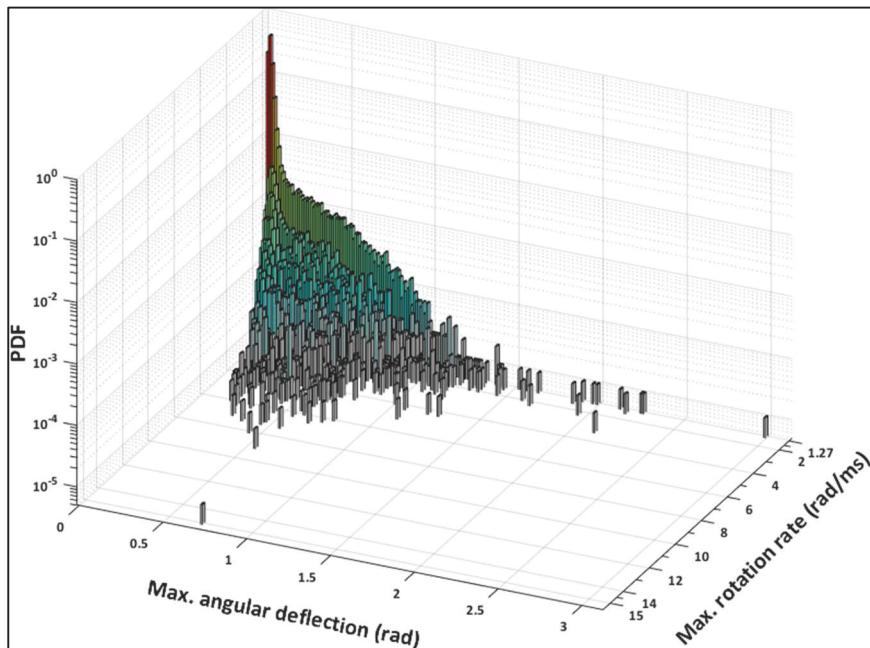


Figure 2.7 Histogramme des maximums vitesses de rotation du vecteur de Stokes et des déflexions angulaires maximales des évènements de polarisation

Dans l'histogramme présenté à la Figure 2.7:

- la déflexion angulaire maximale est la plus grande différence angulaire entre l'état de polarisation au début de l'événement et ceux observés tout au long de la durée de l'événement (fenêtre temporelle de 10 ms);
- le maximum de vitesse de rotation du vecteur de Stokes est la grande vitesse de rotation du vecteur de Stokes observés tout au long de la durée de l'événement (fenêtre temporelle de 10 ms).

Cette figure permet de voir que les plus grandes vitesses de rotation du vecteur de Stokes ne correspondent pas aux plus grandes déflexions angulaires. Au contraire, les vitesses de rotation angulaire les plus élevées semblent plutôt être associées à des valeurs de déflexion angulaire relativement faibles. Par exemple, la plus grande vitesse de rotation du vecteur de Stokes observée sur l'ensemble des données mesurées durant 22 mois est égale à 15,2 rad/ms et correspond à une déflexion angulaire de 0,70 rad.

#### **2.2.4.4 Statistiques sur l'arrivée des évènements**

Au total, 930 fichiers sur 483 811 contiennent des évènements de polarisation (i.e. des vitesses de rotation du vecteur de Stokes dépassant 1,27 rad/ms), soit 0,1922 % de l'ensemble des fichiers. La Figure 2.8 permet d'observer la distribution des temps d'arrivée des évènements sur une période d'observation de 2 heures (graphe du bas) et sur une période d'observation de 84 heures (graphe du haut).

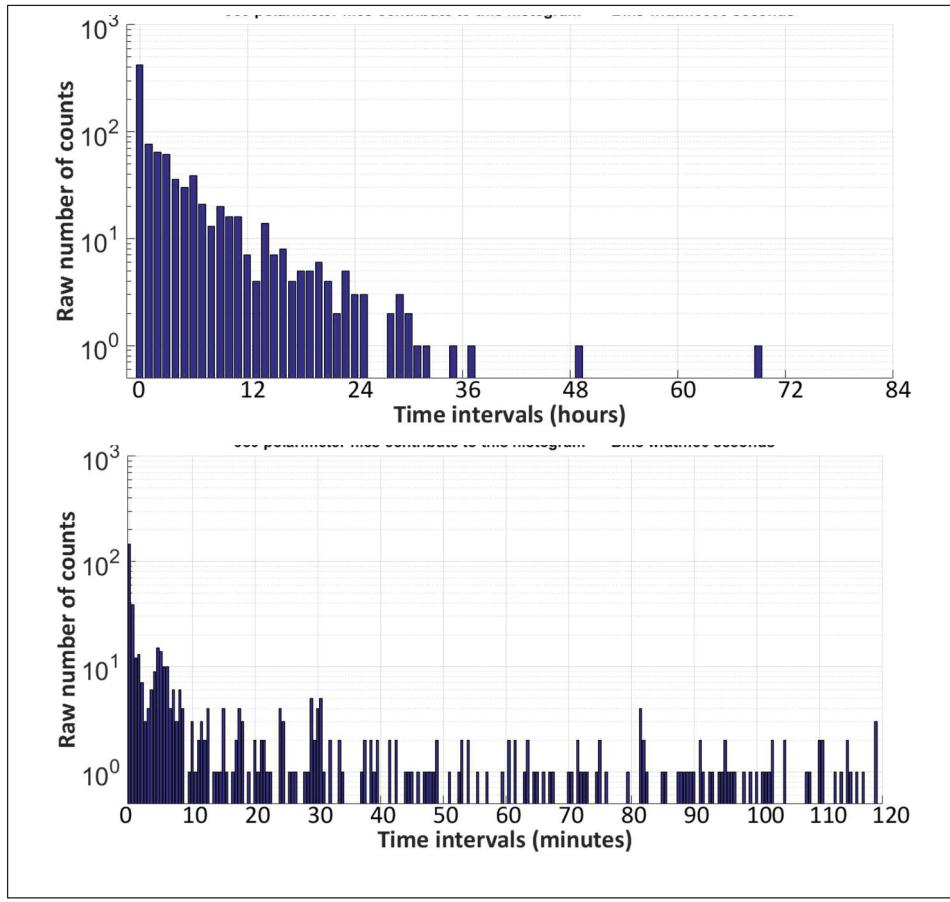


Figure 2.8 Distribution des temps d'arrivée des évènements de polarisation sur une période d'observation de 84 heures (graphe du haut) et de 2 heures (graphe du bas)

Ces distributions de probabilité ne présentent pas les intervalles de temps entre les évènements d'un même fichier, mais plutôt les intervalles de temps entre les fichiers contenant des évènements de polarisation. Pour une cohérence des statistiques, certains cas ont été exclus :

- une trop grande différence de temps entre les fichiers de mesures (plus d'une heure);
- une trop grande différence de temps entre les sous-périodes dans un même fichier (plus d'une heure).

Pour la période d'observation de 84 heures, on note que la distribution décroît exponentiellement avec le temps et que la majorité des évènements sont espacés de moins de 24 heures. Pour la durée d'observation de 2 heures, on note que la majorité des événements

sont espacés de moins de 6 minutes. Il a été donc plus fréquent d'avoir des événements avec un intervalle de temps de l'ordre des minutes et plus rare d'avoir des événements à un intervalle de temps de l'ordre des heures.

Une autre analyse a été d'observer l'influence du choix du seuil de détection des événements de polarisation sur l'intervalle de temps entre ces événements. La Figure 2.9 présente cette analyse par la courbe de l'intervalle de temps moyen entre les fichiers contenant un événement de polarisation en fonction du seuil de détection des événements.

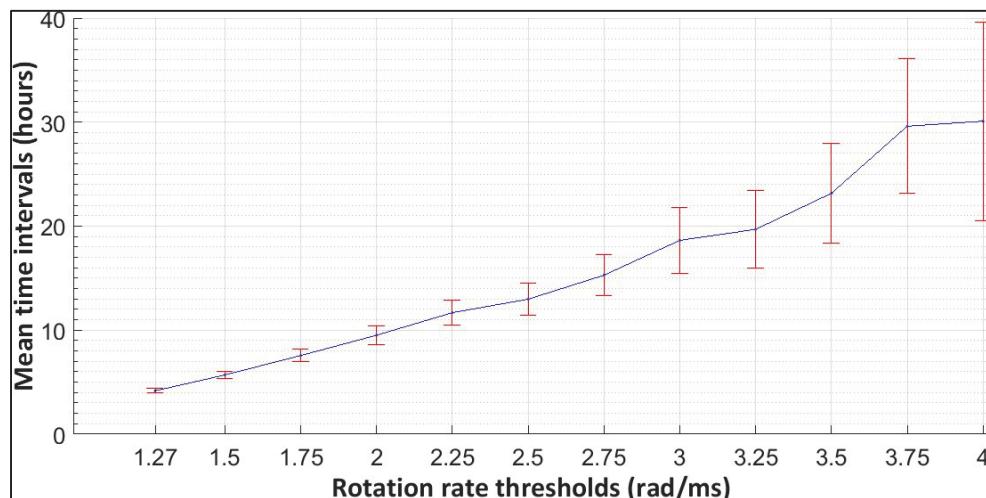


Figure 2.9 Courbe de la valeur moyenne des intervalles de temps entre les fichiers contenant des événements en fonction du seuil de détection des événements de polarisation (avec marge d'erreur)

Plus élevé est le seuil de détection des événements de polarisation, plus élevé est le temps entre des événements de polarisation successifs. Le minimum de la moyenne des intervalles de temps entre les événements de polarisation observés a été de 4,17 heures (avec le seuil = 1,27 rad/ms) et le maximum a été de 47,29 heures (avec le seuil > 4 rad/ms). Il peut être conclure que les événements de polarisation très rapides ont été rarement consécutifs.

## 2.3 Analyse des mesures du polarimètre sur une liaison cohérente à 100 Gbit/s

Dans cette section, les résultats d'analyse des données de monitoring d'une liaison optique enterrée du réseau d'un fournisseur de services nord-américain sont présentés. Cette liaison a été monitorée à l'aide d'un transpondeur cohérent 100G DP-QPSK et d'un polarimètre de juillet 2015 à juillet 2016. L'analyse des données issues du transpondeur cohérent a été rapportée dans l'étude de Michel (2016). Dans cette section, seulement les données issues du polarimètre d'août 2015 à janvier 2016 sont analysées.

### 2.3.1 Présentation de la liaison enfouie à 100 Gbit/s

La configuration de la liaison optique étudiée et les équipements installés sont présentés à la Figure 2.10. Les caractéristiques de la liaison sont :

- une liaison optique de 3 segments de 80 km déployés dans une zone métropolitaine;
- un transpondeur cohérent (*WaveLogic 3*) DP-QPSK à 137,85 Gbit/s de la plateforme 6500 de Ciena avec FEC, compensation électronique de CD et PMD;
- un transmetteur à 10 Gbit/s utilisé comme source de signal optique polarisé linéairement pour le polarimètre;
- un polarimètre Novoptel PM500;
- un spectromètre optique (OSA) pour le monitoring du rapport signal sur bruit optique (OSNR).

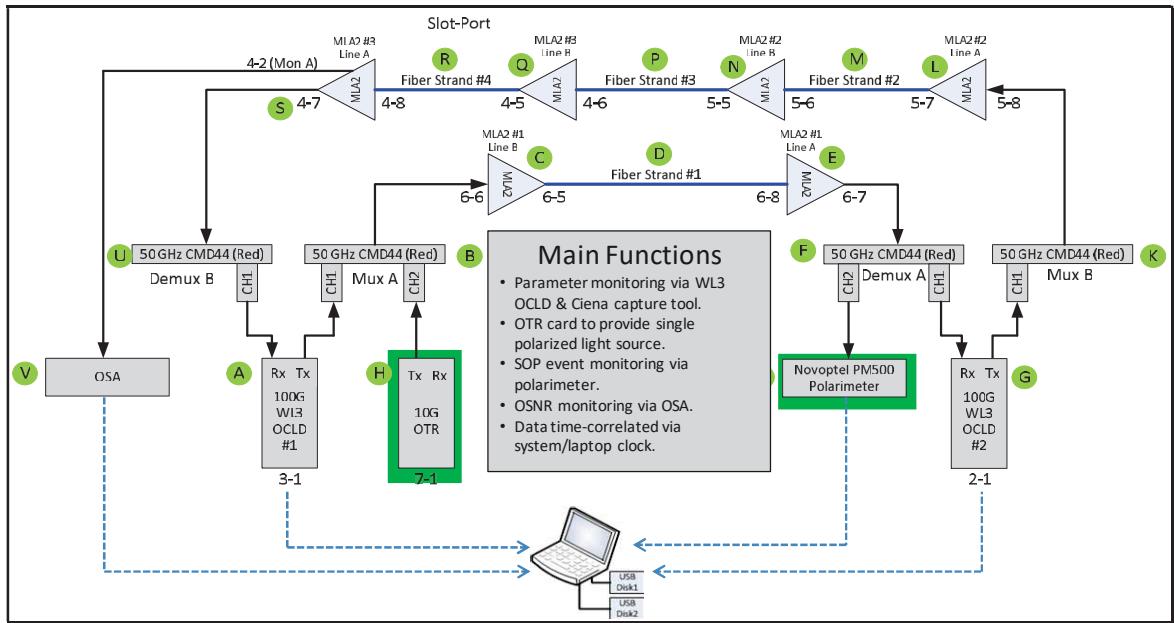


Figure 2.10 Schéma du montage expérimental utilisé pour le monitoring de la liaison optique enfouie à 100 Gbit/s

Tirée de Ciena

### 2.3.2 Présentation du polarimètre étudié : Novoptel PM500

Pour le monitoring des effets de polarisation dans la liaison à 100G, le polarimètre Novoptel PM500 a été utilisé. Il s'agit d'un polarimètre ultra-rapide qui a les mêmes caractéristiques que le polarimètre Novoptel PM1000. Il permet de mesurer les quatre paramètres de Stokes à une vitesse de 100 MHz. Ces mesures peuvent être affichées par le moyen d'un écran connecté au polarimètre sur la sphère de Poincaré ou sous forme d'une courbe de l'évolution temporelle des paramètres de Stokes. L'acquisition des mesures de ce polarimètre peut être configurée en mode continu et en mode déclenché.

### 2.3.3 Acquisition et traitement des données du polarimètre

Dans cette expérience de monitoring, deux modes d'acquisition de mesures (mode déclenché et mode continu) ont été utilisés avec deux différentes fréquences d'échantillonnage.

Le tableau 2.2 présente les quatre sous-périodes de mesures issues du polarimètre qui ont été analysées dans cette section.

Tableau 2.2 Période des mesures du polarimètre (100G)

Sous-période	Période d'échantillonnage (fréquence)	Nombre de fichiers	Nombre de points de mesures	Période de Mesure	Taille des données (Gbit)
<b>Sous-période 1</b>	2 560 ns (390 kHz)	75 225	39 438 989 863	5 août - 11 sept. 2015	276
<b>Sous-période 2</b>	40 960 ns (24 kHz)	814	54 626 614 482	5 oct. - 8 nov. 2015	353
<b>Sous-période 3</b>	40 960 ns (24 kHz)	2	134 217 728	1 déc. - 10 déc. 2015	0,885
<b>Sous-période 4</b>	40 960 ns (24 kHz)	723	48 514 555 900	17 déc. 2015 - 21 janv. 2016	312

Une sous-période est un intervalle de temps pendant lequel le polarimètre a effectué des mesures de façon continue. En mode déclenché, la fréquence d'échantillonnage a été de 390 kHz. Les mesures effectuées couvrent la période du 5 août 2015 au 11 septembre 2015 (38 jours) et sont regroupées dans la sous-période 1. En mode continu, la fréquence d'échantillonnage a été de 24 kHz. Les mesures effectuées couvrent la période du 5 octobre 2015 au 21 janvier 2016 (81 jours) et sont regroupées dans les sous-périodes 2 à 4.

Les fichiers de mesures enregistrés par le polarimètre sont cette fois-ci sous forme binaire et donc nécessitent une conversion en fichier MATLAB. La Figure 2.11 présente le contenu d'un fichier de mesures du polarimètre.

Name	Size	
S	67108864x4	TS: 7.3635e+05 ATE: 12 SamplePeriod_ns: 40960 ME: 26 Normalization: 2 CyclicRecording: 0 Data1Name: 'Power' PowerLeftShift: 7
parameters	1x1	

Figure 2.11 Éléments d'un fichier de mesures du polarimètre (100G)

La partie encadrée en rouge est le contenu du fichier qui est constitué de deux éléments :

- S : matrice de n lignes et de 4 colonnes. Les quatre colonnes de cette matrice correspondent aux paramètres de Stokes ( $S_0, S_1, S_2, S_3$ ). Cette matrice regroupe donc  $n$  valeurs de chacun des quatre paramètres de Stokes capturés à un intervalle de 2 560 ns (polarimètre en mode déclenché) ou de 40 960 ns (polarimètre en mode continu). A la différence de la liaison à 40 Gbits/s où la valeur de  $n$  était de 200 000 points de mesures,  $n$  cette fois-ci dépend de la durée du fichier de mesure. En mode continu, la valeur dominante de  $n$  a été de 67 108 864 points de mesures par fichier de mesure. En mode déclenché, la valeur dominante de  $n$  a été de 524 288 points de mesures par fichier de mesure.
- **parameters**, dont le contenu est présenté sur la Figure 2.11 dans la partie encadrée en bleu, regroupe les informations sur les paramètres du processus d'acquisition du polarimètre. Les paramètres importants sont le *TS* (valeur d'horodatage en MATLAB) et le *Sampleperiod\_ns* (période d'échantillonnage).

Après l'étape initiale de conversion des fichiers de mesures sous le format binaire via MATLAB, le processus de traitement des données est tel que décrit à la sous-section 2.2.3.2. Cependant le script a été adapté à la structure des fichiers de la liaison 100 G et à la fréquence d'échantillonnage du polarimètre. Le script MATLAB de traitement des données issues du polarimètre adapté à la liaison à 100 Gbit/s a été présenté à l'ANNEXE V.

### 2.3.4 Analyse des mesures du polarimètre PM500

L'analyse des mesures du polarimètre PM500 se divise en deux parties. La première partie a été l'analyse des données issue du polarimètre en mode déclenché. La deuxième partie présente l'analyse des données du polarimètre en mode continu.

#### 2.3.4.1 Analyse des mesures du polarimètre PM500 en mode déclenché

L'histogramme des vitesses de rotation du vecteur de Stokes de mesures du polarimètre dans la sous-période 1 est présenté à la Figure 2.12. Cet histogramme a une moyenne de 1,483 rad/ms et un écart-type de 0,496 rad/ms. Cette distribution, comparativement à celles dans les travaux de Mortelette (2014) et de Brugiére (2015) et à la section 2.2, ne peut être ajustée à une distribution de Rayleigh comme le montre bien la figure. Cela est sans aucun doute dû au fait que cette distribution ne représentent pas l'ensemble de toutes les mesures, mais plutôt uniquement de mesures correspondant à des événements de polarisation.

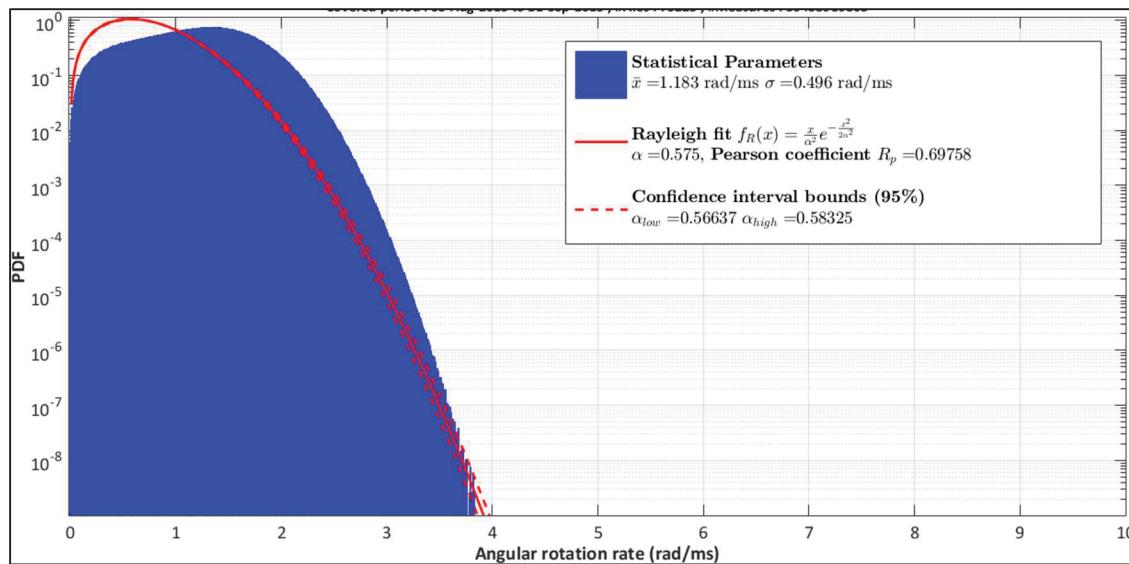


Figure 2.12 Histogramme des vitesses de rotation du vecteur de Stokes des données issues du polarimètre en mode déclenché (du 5 août au 11 septembre 2015)

La Figure 2.13 présente l'histogramme 3D des valeur maximum de vitesse de rotation du vecteur de Stokes durant les événements de polarisation dépassant le seuil de 1,27 rad/ms et les déflexions angulaires maximales correspondantes.

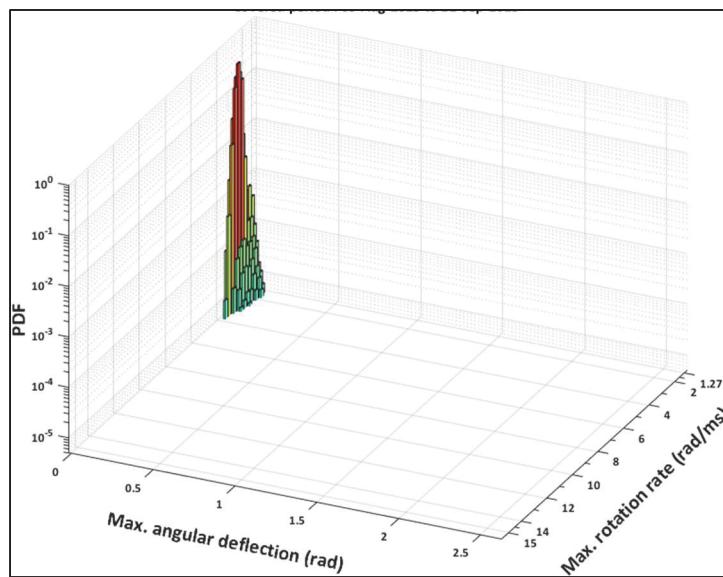


Figure 2.13 Corrélation entre déflexion angulaire maximale et vitesses de rotation maximales du vecteur de Stokes

Cette figure permet de voir que tous les évènements de polarisation ont une déflexion angulaire maximale inférieure à 0,5 rad. Les 500 évènements de polarisation les plus rapides ont été analysés. Cette analyse a consisté à caractériser la signature de ces évènements observés sur la liaison 100G. Le résultat de cette analyse est présenté à la Figure 2.14.

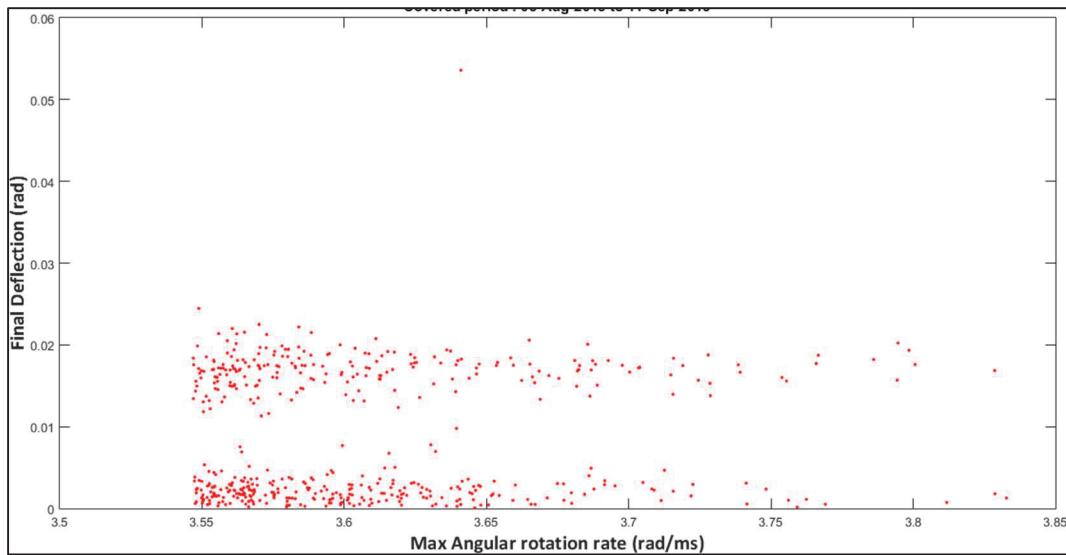


Figure 2.14 Signature des 500 événements de polarisation les plus rapides observés dans la liaison optique à 100G

On peut observer que ces événements rapides illustrés à la Fig. 2.14 ont en général une déflexion angulaire inférieure à 0,03 rad, à l'exception d'un événement (point isolé en haut sur la figure) ayant une vitesse angulaire de 3,6410 rad/ms et que la déflexion angulaire la plus élevée est de 0.0536 rad. L'événement de polarisation le plus rapide a une vitesse de rotation angulaire de 3.8328 rad/ms et une déflexion angulaire de 0,0013 rad. L'ordre de grandeur des déflexions angulaires de ces événements étant inférieur à 11 degrés (0,19 rad) (Nelson et al.(2011), ils peuvent être considérés comme des événements élastiques. Cette analyse montre que les événements rapides de polarisation ont tendance à être des événements élastiques comme le soutient Nelson et al. (2011).

#### 2.3.4.2 Analyse des mesures du polarimètre PM500 en mode continu

L'histogramme des vitesses de rotation du vecteur de Stokes de l'ensemble des données du polarimètre capturé en mode continu est présenté à la Figure 2.15.

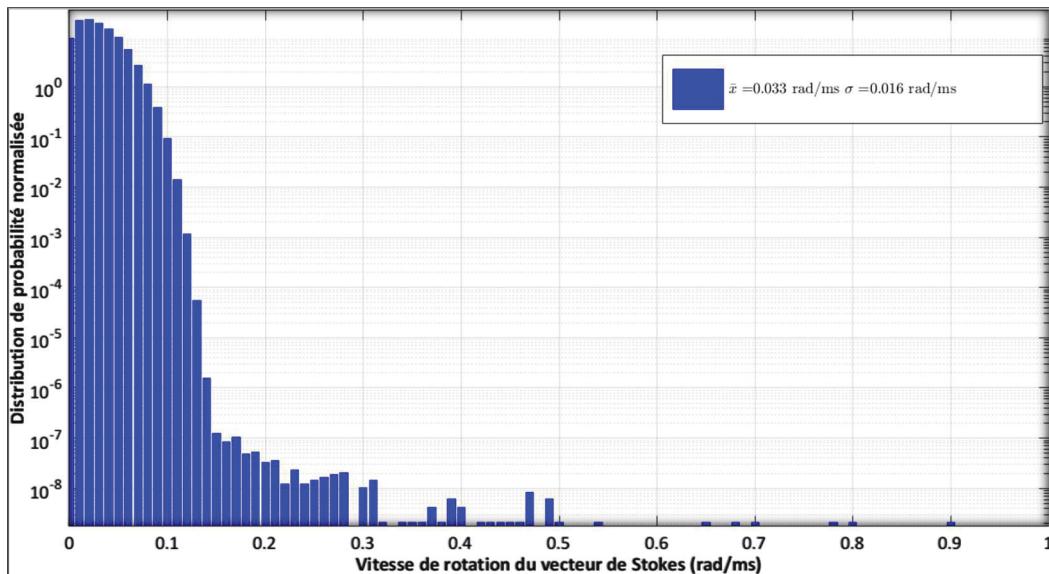


Figure 2.15 Histogramme des vitesses de rotation du vecteur de Stokes issues des données du polarimètre en mode continu (du 5 octobre 2015 au 21 janvier 2016)

Cette distribution a une moyenne de 0,033 rad/ms et un écart-type de 0,016 rad/ms. Elle est constituée de  $5,0174 \times 10^{10}$  points de mesure et couvre 81 jours. Elle suit bien l'allure générale des histogrammes des vitesses de rotation du vecteur de Stokes tel que l'histogramme de la liaison à 40 Gbit/s.

## 2.4 Conclusion

Dans ce chapitre des analyses des mesures de monitoring de deux liaisons optiques ont été présentées. Ces analyses s’inscrivent dans la suite des travaux de Mortelette(2014), de Brugièvre (2015) et Michel(2016). L’analyse de la liaison à 100 Gbits/s a nécessité une adaptation des scripts pour correspondre à la structure des fichiers du polarimètre sur cette liaison. Une nouvelle variante de l’histogramme des vitesses de rotation du vecteur Stokes constitué uniquement par des événements de polarisation a pu être observée. L’évènement le plus rapide sur la liaison à 40 Gbit/s avait une vitesse de rotation de 15,2 rad/ms alors que celui sur la liaison à 100 Gbit/s était de 3,83 rad/ms. Une analyse comparative de l’activité de polarisation et des fluctuations de performance des liaisons aérienne et enfouie est présentée au chapitre 3.



## **CHAPITRE 3**

### **ANALYSE COMPARATIVE DE PERFORMANCE DE TROIS LIAISONS OPTIQUES**

#### **3.1 Introduction**

Les activités de monitoring de couche physique optique menées au *Laboratoire de technologies de réseaux* depuis 2011 sur trois liaisons optiques différentes ont généré tout un ensemble de résultats scientifiques qui ont été rapportés par Amelin (2014), Mortelette (2014), Brugièvre (2015), et Michel (2016). Dans ce chapitre, une comparaison des résultats présentés dans ce mémoire à ceux obtenus dans les travaux précédents est présentée.

Tout d'abord, un rappel des caractéristiques des trois liaisons optiques étudiées à ce jour est fait. Ensuite, les conditions et périodes de monitoring pour chacune des liaisons sont données. Enfin, une synthèse et une analyse comparative du comportement dynamique des trois liaisons optiques étudiées est présentée.

#### **3.2 Environnement et architecture des liaisons optiques comparées**

Les liaisons optiques comparées ont différentes architectures et sont déployées dans différents environnements. Dans le Tableau 1.1 sont présentées les caractéristiques des trois liaisons optiques analysées à ce jour.

Tableau 3.1 Caractéristiques des trois liaisons optiques cohérentes

Liaison optique	Type de liaison	Équipements présents sur le lien	Équipements de monitoring	Zone
CANARIE	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Liaison de 230 km (80% enfouie)</li> <li>- Réseau Canadien pour la recherche (liaison commerciale)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 2 ROADM</li> <li>- Fibre optique LEAF et NDSF</li> <li>- Amplificateurs EDFA</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Transpondeur cohérent DP-QPSK à 40 Gbit/s</li> </ul>	Interurbaine
Côte Ouest	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Liaison aérienne de 1020 km (750 km aérien et 270 km enfoui)</li> <li>- Liaison commerciale</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 14 sections de fibre optique monomode NDSF déployés dans des câbles de garde (OPGW)</li> <li>- 2 sites ROADM</li> <li>- Amplificateurs EDFA</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Transpondeur cohérent DP-QPSK à 40 Gbit/s</li> <li>- Polarimètre Agilent N7786B</li> <li>- 1 transmetteur NRZ à 10 Gbit/s (source du polarimètre)</li> </ul>	Régionale

Tableau 3.2 Caractéristiques des trois liaisons optiques cohérentes (Suite)

Liaison optique	Type de liaison	Équipements présents sur le lien	Équipements de monitoring	Zone
Dallas	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Boucle enfouie de 3 segments de 80 km</li> <li>- Liaison expérimentale</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fibre monomode NDSF</li> <li>- Amplificateur EDFA.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Transpondeur cohérent DP-QPSK de 100Gbit/s</li> <li>- Polarimètre Novoptel PM500</li> <li>- Transmetteur à 10 Gbit/s (source du polarimètre)</li> <li>- spectromètre optique (OSA)</li> </ul>	Métropolitaine

Les liaisons optiques sont de différentes longueurs et de différents types. La liaison CANARIE est une liaison optique interurbaine de 230 km enfouie à 80 % environ reliant le Laboratoire de technologies de réseaux de l'ÉTS (Montréal, Québec) et les laboratoires de Ciena (Ottawa, Ontario). La liaison de la Côte Ouest est de 1020 km déployée à 74 % dans un câble de garde aérien (OPGW) entre la Californie et l'Oregon. La liaison de Dallas est un anneau expérimental enfoui de 240 km (3 x 80 km) déployée dans la région métropolitaine de Dallas (Texas, USA).

Les trois liaisons ont été monitorées au moyen de transpondeurs cohérents. Pour la liaison du réseau CANARIE, le monitoring a été effectué avec un transpondeur cohérent de Ciena à 40

Gbit/s avec une fréquence d'échantillonnage de 1 Hz (soit un taux d'échantillonnage de 1 s) durant une période de deux mois durant la saison d'automne. Pour la liaison commerciale de la Côte Ouest, le monitoring a été fait avec un transpondeur cohérent de 40 Gbit/s avec une fréquence d'échantillonnage de 1 kHz (soit un taux d'échantillonnage de 1 ms). Enfin, pour la liaison enfouie de Dallas, c'est un transpondeur cohérent de 100 Gbit/s avec une fréquence d'échantillonnage de 10 Hz (soit un taux d'échantillonnage de 100 ms) qui a été utilisé. Deux des trois liaisons optiques ont également été monitorées par un polarimètre. Pour la liaison de la Côte Ouest, un polarimètre Agilent N7786B ayant une fréquence d'acquisition de 20 kHz (soit un taux d'échantillonnage de 50 µs) a été utilisé. Pour la liaison de Dallas, un polarimètre Novoptel PM500 a été utilisé à deux fréquences d'acquisition, soient 390 kHz (soit un taux d'échantillonnage 2 560 ns) et 24 kHz (soit un taux d'échantillonnage 40 960 ns) respectivement.

Les liaisons optiques ont différentes architectures et sont déployées dans des environnements très différents. La liaison commerciale interurbaine CANARIE est constituée de 2 ROADM (situé à Lachine (Québec) et Ottawa), fibre optique de type LEAF et NDSF, 2 préamplificateurs (Ottawa et Lachine) et 1 site d'amplification à mi-distance entre le site Ottawa et de Lachine. La liaison commerciale régionale de la Côte Ouest est constituée de 14 sections de fibre optique monomode G.652 (NDSF), 2 ROADM (situé à chaque extrémité), et des sites intermédiaires d'amplification. La liaison métropolitaine expérimentale de Dallas est constituée de 3 sections de fibre optique de 80 km chacune et de sites intermédiaires d'amplification EDFA.

### **Données de monitoring**

Le Tableau 3.3 résume les conditions et périodes de monitoring pour chacune des liaisons optiques étudiées. Dans ce Tableau 3.3, on retrouve, pour chacune de liaisons et pour chaque équipement de monitoring utilisé, le nombre fichiers enregistrés, le nombre de points de mesures et la taille des données en Gigabytes (GB).

Tableau 3.3 Récapitulatif des données de monitoring recueillies sur les trois liaisons optiques

<b>Liaison optique</b>		<b>Nombre de fichiers</b>	<b>Période de Mesure</b>	<b>Volume des données (GB)</b>
<b>CANARIE</b>	<b>40G OCLD</b>	32	- 14 octobre au 20 novembre 2011	0,656
<b>Côte Ouest</b>	<b>100G OCLD</b>	25 000	- 25 octobre au 11 novembre 2012 - Décembre 2013 - Juillet 2014	1 600
	<b>Polarimètre</b>	483 811	- Octobre 2012 à octobre 2014	
<b>Dallas</b>	<b>100G OCLD</b>	4 314	- 16 juillet 2015 au 21 janvier 2016	746 225
	<b>Polarimètre</b>	76 764	- 5 août 2015 au 21 janvier 2016	942

La plus longue période de monitoring a été obtenue sur la liaison de la Côte Ouest. Cette plus longue durée a été de 22 mois avec plus de 1330 heures. Le nombre total de fichiers recueillis (transpondeur cohérent et polarimètre) correspond à un volume de données de 1,6 To. Le volume total des données de monitoring recueillies (transpondeur cohérent et polarimètre) sur

la liaison de Dallas a été de 1,688 To en 6 mois. La liaison CANARIE (la première qui a été étudiée) a eu la plus faible durée de monitoring, soit 37 jours, pour un volume total de données de 656 MB.

### **3.3 Revue des analyses sur les mesures**

Cette section est une synthèse des analyses effectuées sur l'ensemble des mesures de monitoring des trois liaisons optiques.

#### **3.3.1 Liaison optique interurbaine CANARIE**

Les principales observations tirées de l'analyse des résultats de la liaison optique interurbaine du réseau CANARIE sont les suivantes (Amelin, 2014) :

- des variations journalières ont été observées pour le BER, la PMD, et la PDL;
- il n'y a pas de corrélation apparente entre les différents paramètres, mais une possible corrélation semble exister entre la PDL et la température;
- les variations jour nuit de la PMD et de la PDL sont vraisemblablement causées par la température. Observation similaire à (Alaska, 2008);
- l'histogramme des mesures de PMD suit une distribution gaussienne avec une moyenne de 3 ps et un écart-type de 0,8 ps;
- l'histogramme des mesures de PDL suit une distribution gaussienne avec une moyenne de 0,7 dB et un écart-type variant entre 0,25 dB et 0,33 dB. Résultats comparables à ceux de (Woodward et al., 2012).

#### **3.3.2 Liaison optique commerciale de la Côte Ouest**

Les principales observations tirées de l'analyse des résultats de la liaison optique régionale commerciale du réseau du fournisseur de services nord-américain sont les suivantes:

- la fonction de densité de probabilité de la DGD suit une distribution maxwellienne pour les valeurs de DGD inférieures à 5,5 ps;

- l'évolution temporelle de la PDL et de la DGD montre une variation cyclique jour nuit, avec des variations plus importantes durant le jour (entre 8 h et 18 h);
- l'histogramme des vitesses de rotation du vecteur de Stokes suit une distribution gamma généralisée ( $a=0,182$  ;  $d=2,09$  ;  $p=1,68$ ) pour les valeurs de vitesses de rotation du vecteur de Stokes inférieures ou égales à 1,27 rad/ms;
- l'analyse hebdomadaire des événements de polarisation révèle que la probabilité d'apparition d'évènement de polarisation semble plus élevée en semaine qu'en fin de semaine;
- en général, les événements de polarisation observés sont espacés de moins de 6 minutes, mais les événements de polarisation très rapides ( $> 4$  rad/ms) sont rarement consécutifs (en moyenne 47 heures).

### **3.3.3 Liaison optique expérimentale de Dallas**

Les principales observations tirées de l'analyse des résultats de la liaison optique régionale commerciale du réseau du fournisseur de services nord-américain sont les suivantes :

- l'histogramme des vitesses de rotation du vecteur de Stokes constitué des mesures du polarimètre en mode déclenché ne suit pas une distribution de Rayleigh;
- les évènements rapides de polarisation sont en général des évènements élastiques, tel qu'observé par Nelson et al. (2011);
- la moyenne du BER sur l'ensemble des 6 mois de monitoring est de  $7,4 \times 10^{-7}$  dB avec un écart-type de  $1,7 \times 10^{-7}$ , ce qui est largement en dessous de la limite du système de  $3,8 \times 10^{-3}$  (Michel, 2016);
- les valeurs de BER observées sont plus élevées en hiver (janvier) qu'en automne et en été (Michel, 2016);
- la valeur moyenne du SNR est 14 dB avec un écart-type de 0,1 dB. Comme pour le BER, il a été constaté que le SNR est moins élevé en hiver qu'en automne et en été (Michel, 2016).

### 3.4 Analyse comparative du comportement dynamique en polarisation

Dans cette section, une analyse comparative des effets de polarisation observés sur les trois liaisons optiques est effectuée dans le but de faire ressortir les différences de comportement dynamique en polarisation entre une liaison aérienne et une liaison enfouie.

#### 3.4.1 Comparaison des histogrammes de vitesses de rotation du vecteur de Stokes

L'histogramme des vitesses de rotation du vecteur de Stokes lors d'une acquisition continue des données par le polarimètre suit bien une distribution de Rayleigh pour les valeurs de vitesses de rotation inférieures à 1,1 rad/ms et une distribution exponentielle pour les valeurs les plus élevées que sont les événements de polarisation (Brugiére, 2015) et (Mortelette, 2014). Le Tableau 3.4 présente un sommaire des valeurs des paramètres statistiques des histogrammes réalisés à partir des données de polarimètre. L'histogramme des mesures sur le lien de Dallas est constitué uniquement des données issues du polarimètre en mode continu.

Tableau 3.4 Comparaison des vitesses de rotation du vecteur de Stokes

Liaison optique	Nombre de mesures	Moyenne	Écart-type	Maximum
Côte Ouest	$9,68 \times 10^{10}$	0,1812 rad/ms	0,0987 rad/ms	15,2 rad/ms
Dallas	$5,0174 \times 10^{10}$	0,033 rad/ms	0,016 rad/ms	3,83 rad/ms

On peut observer que les vitesses de rotation du vecteur de Stokes de la liaison enfouie de Dallas sont moins élevées que celles observées sur la liaison aérienne de la Côte Ouest.

L'analyse de ces histogrammes nous confirme qu'une liaison enfouie est en effet plus calme qu'une liaison aérienne. Ce résultat est conforme aux attentes. L'état de polarisation du signal optique est appelé à subir de plus grandes variations en fonction du temps du simple fait que

la fibre optique est plus exposée aux conditions environnementales (température, vent) qu'une fibre enfouie.

### 3.4.2 Comparaison des effets de polarisation

Le Tableau 3.5 présente les valeurs extrêmes mesurées par le transpondeur cohérent des paramètres de DGD et PDL sur les trois liaisons optiques comparées.

Tableau 3.5 Caractérisation des valeurs de PMD et PDL

<b>Liaison optique</b>	<b>DGD (en ps)</b>		<b>PDL (en dB)</b>		<b>BER</b>	
	<b>Max</b>	<b>Min</b>	<b>Max</b>	<b>Min</b>	<b>Max</b>	<b>Min</b>
<b>CANARIE</b>	7,11	1	1,822	0,2	$6,39 \times 10^{-9}$	$1,01 \times 10^{-7}$
<b>Côte Ouest</b>	15,2	$3,87 \times 10^{-3}$	4,46	$1,17 \times 10^{-3}$	$3,5 \times 10^{-6}$	$4,58 \times 10^{-6}$
<b>Dallas</b>	3,32	0,7	1,051	0,39	$6,6 \times 10^{-7}$	$3,4 \times 10^{-6}$

On peut observer que valeurs de DGD et de PDL observées sur la liaison aérienne de la Côte Ouest sont les plus élevées. Cette observation peut être expliquée par le fait que la liaison de la Côte Ouest est plus longue et plus exposée aux effets extérieurs (vent, changement de température). Ces observations rejoignent celles de Waddy et al. (2001), Waddy et al. (2005) et Kawasaki et al. (2007). En ce qui concerne les deux liaisons optiques enfouies, elles ont des valeurs comparables de PDL. Bien que les deux liaisons enfouies observées aient presque la même longueur (230 km pour CANARIE et 240 km pour Dallas), la liaison de CANARIE a

des valeurs de DGD plus élevées. Cette différence peut s'expliquer par le fait qu'une partie de la liaison optique de CANARIE (environ 20%) est déployée dans un câble aérien.

Au niveau des valeurs de BER observées, les valeurs des deux liaisons enfouies sont comparables et inférieures à celles mesurées sur la liaison aérienne de la Côte Ouest. Cela peut s'expliquer par le fait que les liaisons enfouies sont plus courtes que la liaison aérienne et sont sans doute caractérisées par une marge système plus élevée.

### 3.5 Conclusion

Ce chapitre est le premier jet d'une comparaison des résultats obtenus jusque-là sur les différentes liaisons optiques caractérisées dans le cadre des activités de monitoring du *Laboratoire de technologies de réseaux*. Comme l'on pouvait s'attendre, la dynamique des effets de polarisation est plus élevée dans une liaison aérienne que dans une liaison enfouie. En effet, les vitesses maximales de rotation du vecteur de Stokes observées sur la liaison aérienne de la Côte Ouest (soit 15,2 rad/ms) sont plus élevées que celles observées sur la liaison enfouie de Dallas (soit 3,83 rad/ms). Les valeurs de DGD et de PDL sont également plus élevées dans la liaison optique aérienne, avec des valeurs maximales respectives de 15,2 ps et 4,46 dB, comparativement aux valeurs maximales observées dans les liaisons enfouies (7 ps pour la DGD et 0,2 dB pour la PDL).

## CHAPITRE 4

### SUIVI DE L'ÉTAT DE POLARISATION PAR UN RÉCEPTEUR COHÉRENT

#### 4.1 Introduction

Les principales fonctions réalisées par les récepteurs cohérents DP-QPSK sont les suivantes:

- estimer les paramètres de ligne et de performance;
- faire la compensation de la CD et de PMD à partir de ces estimations;
- faire le suivi de l'état de polarisation du signal optique.

Le défi le plus important que rencontre le récepteur cohérent lors de la détection du signal optique est le suivi de l'état de polarisation. Les résultats d'une étude de l'erreur de suivi de l'état de polarisation sont présentés dans ce chapitre.

#### 4.2 Récepteur cohérent et estimation de paramètres de ligne et de performance

Le récepteur cohérent, comme le montre la Figure 1.14, comprend un module DSP constitué de plusieurs étages de filtres à réponse impulsionnelle (*Finite Impulse Response, FIR*) assurant la fonction d'égalisation. À partir des coefficients de ces filtres d'égalisation, le récepteur cohérent peut estimer plusieurs paramètres de ligne et de performance. Les paramètres de ligne estimés par le transpondeur sont : la PMD, la PDL, les composantes du vecteur de Stokes ( $S_0$ ,  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$ ). Les paramètres de performance mesurés par le récepteur sont : Pré-FEC BER, SNRx, SNRy.

##### 4.2.1 Estimation des paramètres de ligne et de performance

Le récepteur cohérent permet d'avoir accès à une représentation détaillée du signal dans le domaine électrique par la détection de l'amplitude, la phase, et la polarisation du signal optique (Roberts et al., 2015). Ainsi, grâce à la connaissance de ces paramètres du signal optique, des filtres numériques linéaires peuvent être utilisés pour compenser les dégradations du signal. Les paramètres de la ligne (ou de la liaison optique) peuvent être modélisés par des fonctions

de transfert. Les estimations en temps réel des paramètres de ligne (CD, PMD et SOP) peuvent être obtenus au récepteur par les paramètres utilisés pour compenser les dégradations du signal (Woodward et al., 2008).

#### 4.2.2 Compensation et suivi de l'état de la polarisation

De façon générale la compensation des effets linéaires se fait par un filtrage linéaire avec les coefficients des filtres choisis par inversion de la fonction de transfert modélisant le paramètre de ligne à compenser.

##### 4.2.2.1 Compensation de la CD

Avant l'avènement des transpondeurs cohérents, la compensation de la CD était réalisée en ajoutant à chaque segment (span) de fibre optique à coefficient de dispersion positif une section de fibre optique à coefficient de dispersion négatif (appelé compensateur optique de dispersion); il s'agissait alors de compensation optique de la dispersion. Avec les systèmes cohérents équipés de modules DSP, il est désormais possible de compenser électroniquement la dispersion grâce à l'accès au domaine électrique du signal.

La dispersion chromatique étant un effet linéaire, sa compensation électronique peut être réalisée par un filtrage linéaire. Les coefficients des filtres utilisés pour faire ce filtrage linéaire sont choisis par inversion de la fonction de transfert modélisant la fibre optique avec l'effet de la CD. L'équation (4.1), tirée de Roberts et al. (2009) décrit cette fonction de transfert qui est une fonction de filtrage passe-tout (*all-pass filter*) :

$$H_{disp}(f) = \exp\left(-\frac{j\beta_2\omega^2L}{2}\right) \quad (4.1)$$

où  $\beta_2$  est la dispersion de la vitesse de groupe ou dispersion intramodale (Group-velocity dispersion, GVD) en  $\text{ps}^2/\text{km}$ ,  $\omega$  est la fréquence angulaire du signal, exprimée en rad/s, et  $L$  est la longueur de la fibre optique exprimée en km.

Pour une valeur de baud donnée, le nombre requis de coefficients de filtre dépend linéairement de la quantité de CD à compenser (Roberts et al., 2009).

Dans un transpondeur cohérent à 40 Gbit/s, une dispersion chromatique allant jusqu'à 50 000 ps/nm peut être compensée (Roberts et al., 2009).

#### 4.2.2.2 Compensation de la PMD

Un signal optique ayant subi un effet de PMD peut-être modélisé par la matrice 2 x 2 présentée à l'équation (4.2), tirée de Roberts et al. (2009):

$$\begin{bmatrix} R_x \\ R_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{xx}(\omega) & H_{yx}(\omega) \\ H_{xy}(\omega) & H_{yy}(\omega) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

où  $R$ ,  $H$  et  $E$  sont respectivement les signaux reçus X-pol et Y-pol, la réponse du canal (en valeur complexe, partie réelle et imaginaire) et les signaux transmis X-pol et Y-pol.

Cette matrice du canal conduit au choix de quatre filtres linéaires, comme indiqué à la figure 1.14, afin de compenser la PMD, soit un filtre pour chaque fréquence ( $\omega$ ). Dans un transpondeur cohérent à 40 Gbit/, une PMD allant jusqu'à 25 ps peut être compensée (Roberts et al., 2009).

#### 4.2.2.3 Techniques de suivi de l'état de polarisation

Le récepteur cohérent doit assurer l'ajustement de l'état de polarisation du signal à son entrée. Pour cela, il doit être capable de récupérer la phase de l'onde porteuse et son processus de suivi de l'état de polarisation doit être assez rapide pour suivre les événements transitoires de polarisation les plus rapides (El-Darawy et al., 2008). Plusieurs techniques sont utilisées à ce jour pour suivre l'état de polarisation d'un signal optique, soient la technique basée sur les paramètres de Stokes, les algorithmes des filtres adaptatifs et le filtrage de Kalman.

- **La technique basée sur les paramètres de Stokes**

Le démultiplexage de la polarisation par l'analyse du signal dans l'espace de Stokes a été introduit par (Szafraniec, Marshall et Nebendahl, 2010). Avec cette méthode, il n'est pas nécessaire de démoduler le signal ni de connaître le format de modulation.

Les vecteurs de Stokes ne contiennent pas les informations sur la phase du signal reçu comme c'est le cas des vecteurs de Jones, mais ils contiennent par contre les informations sur l'état de polarisation (Szafraniec, Marshall et Nebendahl, 2013). Ils peuvent donc être exploités pour caractériser les signaux multiplexés en polarisation, estimer la fréquence, la phase, la CD et PMD.

- **Les algorithmes des filtres adaptatifs**

Le module DSP du récepteur cohérent utilise plusieurs blocs de filtre à réponse impulsionnelle FIR pour compenser les distorsions du signal optique reçu comme les effets de polarisation. L'adaptation des coefficients du filtre peut être réalisée par plusieurs algorithmes tels que RLS (*Recursive Least Squares*), LMS (*Least Mean Squares*) et CMA (*Constans Modulus Algorithm*) (Proakis, 1989). Le choix de l'algorithme est fait selon un compromis entre la complexité de son implémentation et sa vitesse de convergence. Les algorithmes LMS et CMA ont une convergence lente comparée au RLS, mais sont plus faciles à implémenter (Roberts et al., 2009). Les algorithmes LMS et CMA ont sensiblement la même précision d'égalisation, mais le LMS a une convergence plus rapide que celle du CMA (Makki, Dey et Khan, 2010). Le processus de suivi de la polarisation doit être assez rapide pour suivre les plus rapides effets transitoires de polarisation (El-Darawy et al., 2008) afin de garantir une transmission sans erreur. L'algorithme LMS, à la différence de l'algorithme CMA, requiert l'estimation de la phase de la porteuse (Makki, Dey et Khan, 2010). Une mauvaise estimation de la phase fait augmenter le temps de convergence des algorithmes d'égalisation adaptative (*adaptive equalizer*) et encore plus dans les variations temporelles extrêmes de la phase (Benvenuto et Cherubini, 2002). Ces pires cas de figure peuvent être rencontrés lors de variations de la

polarisation à la fois grandes et rapides. Avec l'algorithme LMS en cas d'effets transitoires extrêmes de la polarisation, il se pourrait que les erreurs de transmission augmentent.

Des études ont été menées sur la tolérance des récepteurs cohérents utilisant l'algorithme LMS face aux variations transitoires extrêmes de l'état de polarisation du signal optique.

L'une de ces études a montré que jusqu'à des variations de 60 kHz (soit 376 991.118 rad/s) de l'état de polarisation, les caractéristiques du module ASIC (*Application-Specific Integrated Circuit*) permettent un bon rendement des algorithmes d'adaptation des coefficients des filtres FIR avec la méthode LMS en présence de 60 ps de DGD, avec une pénalité de 0.5 dB en OSNR pour les cas extrêmes de variations de polarisation (Roberts et al., 2009).

Une autre étude d'El-Darawy et al. (2008) a porté sur la capacité des algorithmes adaptatifs dans un récepteur cohérent FPGA DP-QPSK à 2.8 Gbit/s à suivre les grandes fluctuations de polarisation. Un algorithme est caractérisé de lent ou rapide selon que son temps de convergence soit long ou court.

L'impact sur la qualité du signal reçu a été étudié selon la vitesse de suivi de l'algorithme adaptatif (entre 0.75 µs et 3.0 µs) et une vitesse de rotation de la polarisation allant jusqu'à 40 krad/s. Il en ressort qu'un algorithme de suivi plus rapide entraîne une pénalité en sensibilité du récepteur moins élevée pour les variations rapides de polarisation ( $> 7$  krad/s) et un meilleur niveau de BER qu'un algorithme à convergence lente.

#### • Le filtrage de Kalman

Le filtrage de Kalman est une technique générale d'estimation introduite en 1960. Il peut servir à faire le suivi de la phase de la porteuse et de la polarisation et à estimer la PMD de 1<sup>er</sup> ordre. Il converge plus rapidement que l'algorithme LMS. Il peut être utilisé pour modéliser les effets linéaires et non linéaires. Dans le cas des effets non linéaires, il s'agit de *Extended Kalman filter* (Szafraniec, Marshall et Nebendahl, 2013).

### 4.3 Bande passante du filtre adaptatif et erreur de suivi de l'état de polarisation

Le récepteur cohérent qui reçoit un signal multiplexé en polarisation (*Dual-polarization*, DP) doit être capable de distinguer le signal polarisé en X de celui polarisé en Y. Pour pouvoir distinguer ces deux états de polarisation, le récepteur cohérent doit suivre la polarisation du signal à son entrée. Dans le cas d'une mauvaise identification de la polarisation, c'est-à-dire d'une différence angulaire entre la polarisation réelle et celle estimée par le récepteur, des erreurs peuvent être observées au récepteur. Ainsi le signal transmis dans la polarisation X apparaîtra dans le signal reçu dans la polarisation Y. Au niveau du diagramme de constellation, l'erreur apparaîtra comme quelques points de la constellation de la polarisation X aux environs des points de la constellation de la polarisation Y. Au récepteur, cela peut se traduire par l'observation de bruit dans les données de la polarisation Y, et donc affecter le BER si le bruit est trop élevé.

Un filtre adaptatif avec une large bande passante permet à un récepteur cohérent de suivre avec plus de précision les variations grandes et rapides de l'état de polarisation du signal à son entrée. Mais cela n'est possible qu'avec un module ASIC plus complexe en augmentant la puissance de calcul requis. Par contre, un filtre adaptatif avec une bande passante plus faible nécessite moins de puissance de calcul mais occasionne une plus grande erreur de suivi de polarisation, donc potentiellement plus d'erreurs.

Dans cette section est présentée une étude de l'impact de la largeur de la bande passante du filtre adaptatif sur l'habileté du récepteur cohérent à suivre en temps réel la polarisation du signal à son entrée. Les objectifs de cette étude sont d'évaluer:

- pour une bande passante B, combien la valeur de l'erreur angulaire D peut excéder un certain pourcentage P dans le temps;
- pour une bande passante B, le seuil d'erreur qui ne sera jamais dépassé.

### 4.3.1 Modélisation

Pour observer l'impact du choix de la bande passante du filtre adaptatif sur la capacité du récepteur cohérent à suivre les changements de l'état de polarisation, une étude de l'erreur de suivi pour différentes valeurs de bande passante B a été faite. L'analyse considère que le filtre adaptatif LMS qui fait le suivi de l'état de polarisation dans un récepteur cohérent s'apparente à un filtre passe-bas de premier ordre et de bande passante B. Pour cette analyse, voici ce qui a été utilisé :

- les données de monitoring capturées par le polarimètre dans la liaison commerciale du fournisseur de services nord-américain à 40 Gbit/s (les détails ont été présentés à la sous-section 2.2.1);
- une modélisation approximative du filtre adaptatif (LMS) d'un récepteur cohérent par un filtre passe-bas (*Low pass filter*, LPF) d'ordre 1 de bande passante B, ayant pour fonction de transfert  $H_T$ , tel que défini par l'équation (4.3).

$$H_T(\omega) = \left(1 + i \frac{\omega}{\omega_0}\right)^{-1} \quad (4.3)$$

où  $\omega_0 = 2 \times \pi \times B$ .

La méthode d'analyse qui a été adopté n'est pas spécifique à un récepteur particulier et peut être adaptée pour différents modèles de récepteur cohérent de bande passante et seuil de Pré-FEC BER différents.

La Figure 4.1 présente le diagramme de la simulation des étapes dans l'étage de suivi de l'état de polarisation du récepteur.

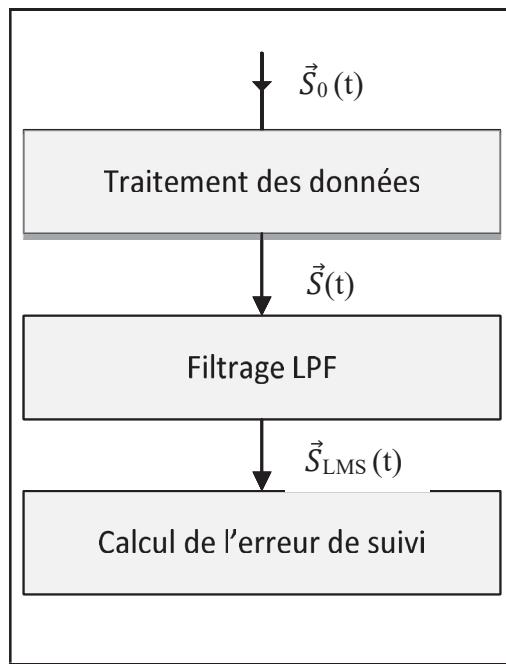


Figure 4.1 Diagramme à haut niveau du processus d'analyse de l'erreur de suivi de la polarisation

Après le traitement des mesures brutes de vecteurs de Stokes  $\vec{S}_0(t)$  enregistrées par le polarimètre, des données de vecteurs de Stokes traités  $\vec{S}(t)$  sont générées. Un filtre passe-bas LPF est ensuite appliqué aux valeurs du vecteur de Stokes  $\vec{S}(t)$  afin d'obtenir après filtrage un vecteur constitué des valeurs filtrées,  $\vec{S}_{LMS}(t)$ . Les trois composantes du vecteur de Stokes ( $S_1$ ,  $S_2$  et  $S_3$ ) sont filtrées séparément. Ensuite l'erreur angulaire de suivi de la polarisation peut être calculée en faisant la différence entre  $\vec{S}_{LMS}(t)$  et  $\vec{S}(t)$ . Les détails de chacune des étapes du calcul de l'erreur de suivi de la polarisation (Figure 4.1) sont présentés dans la sous-section suivante.

#### 4.3.2 Processus d'analyse de l'erreur de suivi de la polarisation

##### 4.3.2.1 Traitement des données

Pour effectuer l'analyse de l'erreur de suivi, les données issues brutes du polarimètre  $\vec{S}_0$  ont subi un traitement initial avant de passer au suivi de l'état de polarisation par le filtre adaptatif.

L'outil de traitement initial des données est une adaptation de l'outil MATLAB développé dans Brugi  re (2015, Annexe V, p.163) dans lequel certaines étapes ont été supprimées pour les besoins de l'analyse. Le traitement initial s'arrête donc à l'étape 3 ( limination des valeurs transitoires). Pour plus de détails sur le traitement des données du polarimètre, il faut se référer à la sous-section 2.2.3.2.

#### 4.3.2.2 Filtrage LPF

Cette étape a pour objectif de simuler les étapes du suivi de l'état de polarisation par le filtre adaptatif d'un récepteur cohérent afin de calculer l'erreur de suivi angulaire. Le calcul se fait au moyen du script MATLAB *untracked\_pol\_angle\_function* (Crawford et al., 2015) présenté à l'ANNEXE VI.

Le script initial permettait de traiter un fichier de mesures à la fois. Une contribution du projet a été d'automatiser ce script afin de traiter plusieurs fichiers de mesure à la chaîne et de réduire le temps de calcul en l'intégrant dans le script de calcul parallèle développé par Brugi re (2015). Suite au traitement initial de l'étape précédente, une matrice des vecteurs de Stokes traités  $\vec{S}(t)$  sans valeurs transitoires est obtenue.

La Figure 4.2 présente les étapes de l'implémentation du filtrage LPF.

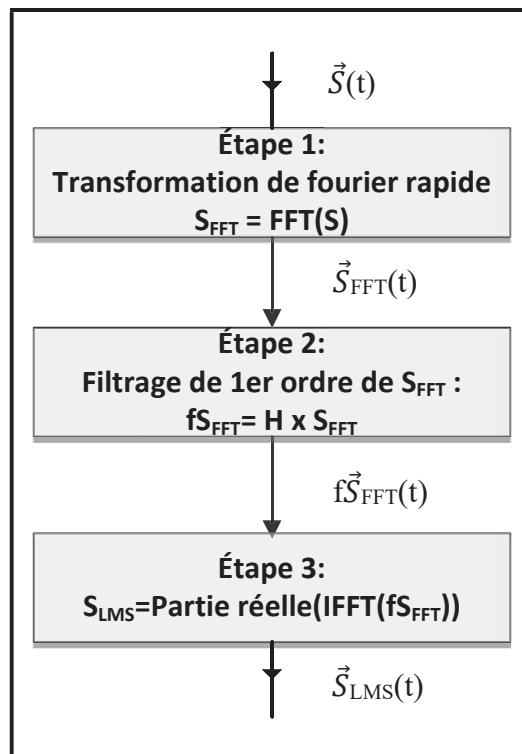


Figure 4.2 Diagramme du filtrage LPF

Comme l'indique la Figure 4.2, les données passent par les trois étapes suivantes :

- 1- transformation de Fourier rapide (*Fast Fourier Transformation*, FFT) de  $\vec{S}(t)$ ;
- 2- filtrage de premier ordre de  $\vec{S}_{FFT}(t)$ ;
- 3- estimation du vecteur de Stokes  $\vec{S}_{LMS}(t)$ .

La première étape est la transformation de Fourier rapide de  $\vec{S}(t)$ . Elle est réalisée par la fonction MATLAB *fft\_config* (Crawford et al., 2015) et présentée à l'ANNEXE VII. De cette étape est obtenue une représentation fréquentielle de  $\vec{S}(t)$  désignée par  $\vec{S}_{FFT}(t)$  et la pulsation  $\omega$  qui est utilisée dans la fonction de transfert  $H_T$ , voir l'équation (4.3). La deuxième étape est l'application du filtrage de premier ordre par la fonction de transfert  $H_T$  (défini à l'équation (4.3)) au vecteur  $\vec{S}_{FFT}(t)$ . À la fin de cette étape, on obtient le vecteur de Stokes  $\vec{S}_{FFT}(t)$  filtré et désigné par  $f\vec{S}_{FFT}(t)$ . La troisième étape est l'application de la transformée de Fourier inverse rapide IFFT à  $f\vec{S}_{FFT}(t)$ . Seule la partie réelle est récupérée par la fonction *real* de MATLAB. Le résultat de cette étape est l'estimation du vecteur de Stokes, désignée par  $S_{LMS}$ .

#### 4.3.2.3 Calcul de l'erreur de suivi angulaire $\theta$

La Figure 4.3 présente les deux étapes du calcul de l'erreur de suivi après l'estimation du vecteur de Stokes suivi  $\vec{S}_{LMS}(t)$ .

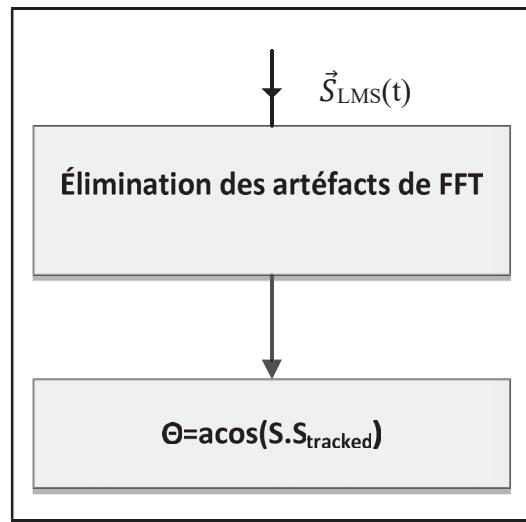


Figure 4.3 Diagramme du calcul de l'erreur de suivi angulaire

Comme l'indique la Figure 4.3, avant le calcul de l'erreur de suivi les artefacts générés par la transformée de fourrier rapide doivent être éliminés.

La première étape est donc l'élimination des artefacts de FFT, car le FFT produit quelques oscillations au début et à la fin des valeurs de  $\vec{S}_{LMS}(t)$ . Après plusieurs tests, il a été choisi de supprimer 2000 points au début et à la fin sur l'ensemble de  $\vec{S}_{LMS}(t)$ .

La deuxième étape de l'implémentation de la technique du filtre adaptatif est le but de toute cette chaîne d'étape, à savoir le calcul de l'erreur de suivi angulaire  $\theta$ , selon la formule,

$$\theta = \cos^{-1}[\vec{S}(t) \cdot \overrightarrow{S_{LMS}}(t)] * \frac{180}{\pi} \quad (4.4)$$

où  $\vec{S}$  désigne le vecteur de Stokes réel,  $\overrightarrow{S_{LMS}}$  le vecteur de Stokes estimé par le récepteur. Notons que  $\theta$  est exprimé en degrés.

#### 4.3.3 Résultats de l'analyse

Dans cette section, une analyse de l'impact du choix de la bande passante du filtre adaptatif sur l'erreur de suivi de polarisation est présentée. Les bandes passantes choisies pour l'analyse sont les suivantes : 600 Hz, 1 kHz, 3 kHz, 6 kHz, 10 kHz, 30 kHz et 100 kHz. Les résultats pour les bandes passantes de 1 kHz et 6 kHz sont présentés dans les sous-sections suivantes et les autres ont été placés en annexe. Ces deux bandes passantes ont été considérées comme les plus pertinentes (Crawford et al., 2015).

##### 4.3.3.1 Histogramme des erreurs de suivi angulaire

Pour l'ensemble des données considérées dans cette analyse (c'est-à-dire toutes les mesures durant les 22 mois), un histogramme de l'erreur de suivi angulaire  $\theta$  a été construit pour toutes les valeurs de bande passante étudiées. Les histogrammes correspondant à  $B = 1$  kHz et  $B = 6$  kHz sont présentés à la Figure 4.4.

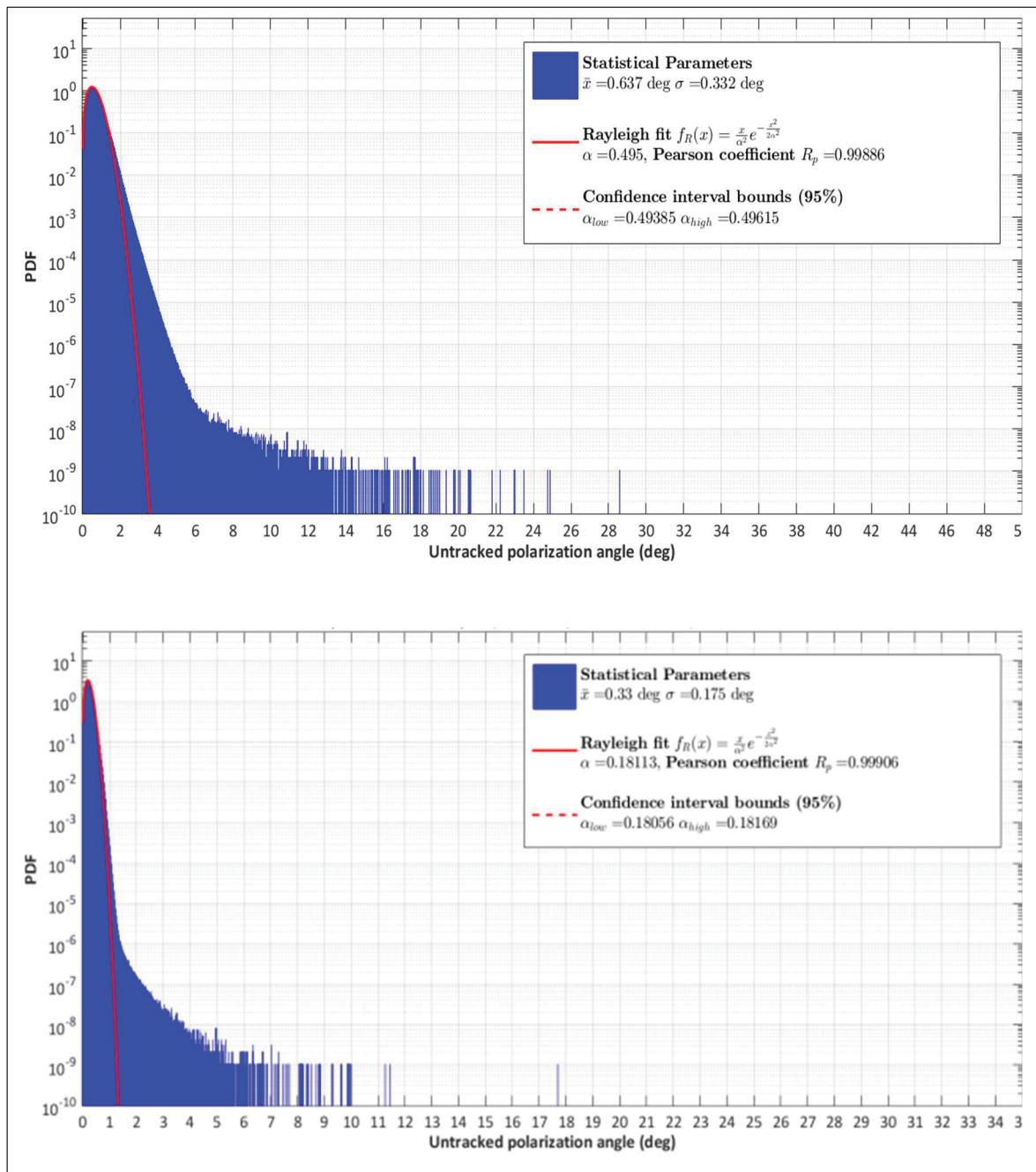


Figure 4.4 Histogramme des erreurs de suivi angulaire pour un filtre de suivi de bande passante de 1 kHz (en haut) et de 6 kHz (en bas)

Les autres histogrammes des erreurs de suivi angulaire  $\theta$  sont présentés à l'ANNEXE IX. Les histogrammes ont été obtenus en utilisant la fonction *histc* de MATLAB. Cette fonction a pris

en paramètre d'entrée le vecteur colonne de l'erreur de suivi angulaire  $\theta$  obtenu à la sous-section 4.3.2.3 et le vecteur colonne des épaisseurs des barres (chaque barre correspond à un intervalle de valeur) de l'histogramme. Le résultat de cette fonction *histc* est un vecteur colonne des occurrences des barres de l'histogramme. Le script MATLAB développé permettant de tracer les histogrammes est présenté à l'ANNEXE VIII.

L'analyse des histogrammes indique que plus la bande passante du filtre de suivi augmente, plus l'erreur angulaire de suivi diminue tel qu'attendu. Ainsi, pour un filtre adaptatif de bande passante égale à 1 kHz, la plus grande valeur de l'erreur de suivi angulaire est de 28,6 ° et la valeur moyenne est égale à 0,64°. Pour un filtre adaptatif de 6 kHz, les erreurs angulaires sont inférieures à 5° et la valeur moyenne est égale à 0,33 °.

La conséquence de l'erreur de suivi de l'état de polarisation se traduit par des erreurs binaires. L'erreur binaire introduite par l'erreur de suivi de l'état de polarisation est donc proportionnelle à  $\theta$ . Mais, selon (Crawford et al., 2015), elle est aussi fonction de la localisation du vecteur de Stokes  $\vec{S}$  sur la sphère de Poincaré lorsque l'erreur de suivi de l'état de polarisation se produit. Dans la suite de l'analyse, il a été important de déterminer la localisation de l'état de polarisation sur la sphère de Poincaré pour analyser l'impact sur l'erreur de suivi de la polarisation.

#### 4.3.3.2 Histogramme en 3D des angles $\theta$ et $\phi$

La localisation de l'état de polarisation sur la sphère de Poincaré à un instant  $t_i$  où se produit l'erreur de suivi de la polarisation est introduite dans la suite de notre analyse par la matrice de rotation de polarisation  $R(t_i)$ . Cette matrice  $R(t_i)$  est définie tel que :

$$R(t_i)\vec{S}_{LMS}(t_i) = [1, 0, 0] \quad (4.5)$$

L'équation (4.5) signifie qu'à un instant  $t_i$  la matrice de rotation de polarisation  $R(t_i)$  établit le plus court chemin de rotation sur la sphère de Poincaré entre le vecteur  $\vec{S}_{LMS}(t_i)$  au vecteur

de Stokes [1,0,0] (valeur des paramètres de Stokes pour un état de polarisation linéaire horizontale). Cette rotation du vecteur  $\vec{S}_{LMS}(t_i)$  vers l'équateur de la sphère de Poincaré illustre le comportement du récepteur cohérent qui est continuellement en train de ramener la polarisation du signal à son entrée à une polarisation linéaire horizontale [1,0,0].

Lorsque le vecteur de Stokes  $\vec{S}(t_i)$  est différent du vecteur de Stokes  $\vec{S}_{LMS}(t_i)$ , la matrice de polarisation  $R(t_i)$  permet de trouver le vecteur de l'erreur de suivi de la polarisation  $\vec{E}(t_i)$  tel que :

$$\vec{E}(t_i) = R(t_i)\vec{S}(t_i) \quad (4.6)$$

Le vecteur de l'erreur de suivi de la polarisation  $\vec{E}(t_i)$  aura tendance à rester dans la région de l'axe (+1,0,0) de la sphère de Poincaré comme l'indique la Figure 4.5.

Chaque vecteur de l'erreur de suivi de la polarisation  $\vec{E}(t_i)$  peut-être décomposé en coordonnées sphériques des angles  $\theta(t_i)$  et  $\phi(t_i)$  relative à l'axe [1,0,0] axis tel que :

$$\vec{E}(t_i) = [x(t_i), y(t_i), z(t_i)] = [\cos \theta(t_i), \sin \theta(t_i) \cos \phi(t_i), \sin \theta(t_i) \sin \phi(t_i)] \quad (4.7)$$

où  $\theta(t_i)$  est l'angle entre l'axe [+1,0,0] et le vecteur  $\vec{E}(t_i)$  ;  $\phi(t)$  est l'angle de rotation aux environs de [+1,0,0] tel que  $\phi(t_i) = 0$  signifiant que le vecteur  $\vec{E}(t_i)$  est dans le plan XY avec  $x > 0$  et  $y > 0$  à condition que  $\theta(t_i) < 90^\circ$ .

L'analyse des angles  $\theta$  et  $\phi$  est présentée sous forme d'un histogramme en trois dimensions (3D). Le script MATLAB *pola\_processing\_PolTrack\_sub\_worker* a été développé pour obtenir cet histogramme 3D et présenté à ANNEXE X. Les étapes de l'obtention de cet histogramme sont présentées à la Figure 4.6.

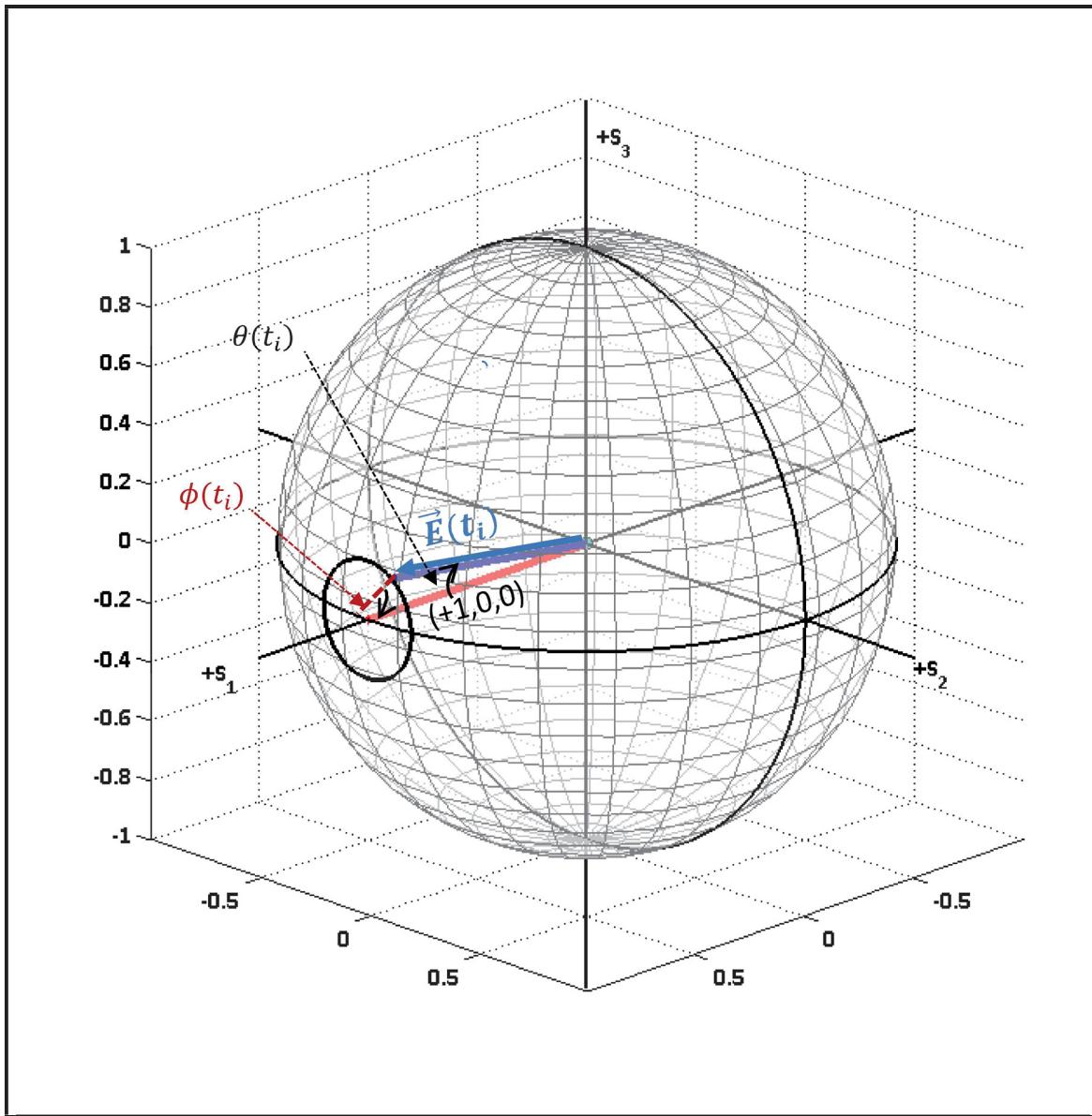


Figure 4.5 Représentation sur la sphère de Poincaré du vecteur de l'erreur de suivi de la polarisation (en bleu le vecteur  $\vec{E}$  et en rouge l'axe  $(+1,0,0)$ )

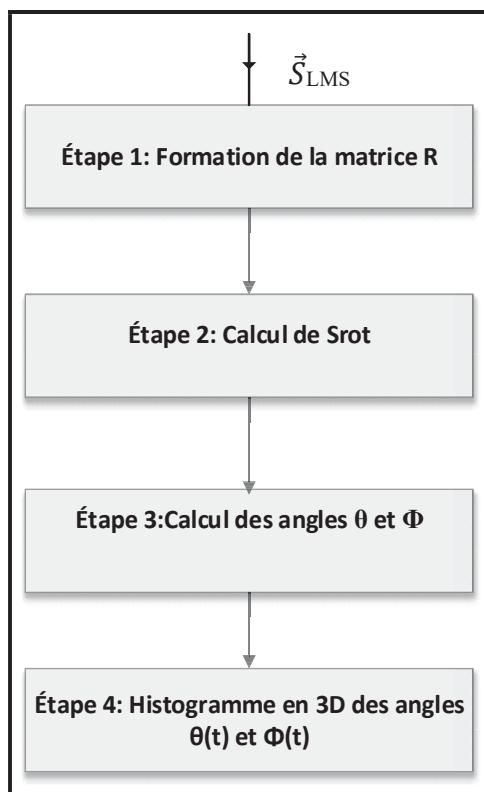


Figure 4.6 Diagramme du processus de calcul de l'histogramme 3D des angles  $\theta$  et  $\phi$

La première étape est la création de la matrice R. Le calcul de cette matrice est fait à partir de la fonction MATLAB *RotationAlongArc\_multi* et de sa sous-fonction *StokesRotation* (Crawford et al., 2015) présentées à l'ANNEXE XI. Cette fonction prend en paramètres d'entrée  $\vec{S}_{LMS}$ , le vecteur destination [1;0;0] et un paramètre de tolérance angulaire égale à 0,0001° (Crawford et al., 2015). La fonction permet de générer la matrice R [3 X 3 X N]. Le paramètre de tolérance définit le minimum angulaire entre le vecteur initial et destination; lorsque la différence angulaire est inférieure à la valeur limite définie, la formation de la matrice R requiert une approche spéciale (qui dépasse le cadre du projet).

Une illustration du résultat de cette première étape à savoir la matrice R [3 X 3 X N] est présentée à la Figure 4.7. Le N correspond aux nombres de vecteurs de Stokes  $\vec{S}_{LMS}$ . Pour

chaque nième vecteur de Stokes  $\vec{S}_{LMS}$ , une matrice  $R( :, :, n)$  de dimensions  $3 \times 3$  a été formée à partir de la formule de rotation de Rodrigues, tel qu'illustré à la Figure 4.7.

```
R(:,:,198090) =
-0.2874 -0.9140 0.2864
0.9140 -0.1723 0.3673
-0.2864 0.3673 0.8849

R(:,:,198091) =
-0.2913 -0.9139 0.2827
0.9139 -0.1785 0.3645
-0.2827 0.3645 0.8872
```

Figure 4.7 Illustration du contenu d'une matrice de rotation R

Le contenu de la matrice est l'ensemble des valeurs par rapport au plan ( $S_1, S_2, S_3$ ) de la sphère de Poincaré permettant de ramener un nième vecteur de Stokes  $\vec{S}_{LMS}$  vers l'équateur de la sphère [1,0,0]. Par exemple, à la Figure 4.7 on peut voir  $R( :, :, 198\ 090)$  qui est la matrice de rotation pour le 198 090<sup>ième</sup> vecteur de Stokes  $\vec{S}_{LMS}$ . Le produit scalaire de  $\vec{S}_{LMS}$  par la matrice de rotation  $R( :, :, 198\ 090)$  ramènera  $\vec{S}_{LMS}$  à l'axe [1,0,0] (voir équation (4.5)).

$$\text{Ainsi pour le } 198\ 090^{\text{ième}} \vec{S}_{LMS} \begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} -0,2874 & -0,9140 & 0,2864 & 1 \\ 0,9140 & -0,1723 & 0,3673 & 0 \\ -0,2864 & 0,3673 & 0,8849 & 0 \end{pmatrix} = 0$$

La deuxième étape est de faire la rotation du vecteur de Stokes  $\vec{S}$  à partir de la matrice de rotation R de l'étape précédente. Le vecteur de Stokes  $S_{rot}$  est le résultat de la rotation du vecteur  $\vec{S}$  tel que :

$$S_{rot}(n, :) = R(:, :, n) * S(n, :) \quad (4.8)$$

où  $S_{rot}$  est le vecteur de Stokes de  $\vec{S}$  ramené vers l'axe [1,0,0] (équateur de la sphère de Poincaré), n est le nombre de vecteurs dans cette matrice qui égale au nombre de vecteurs Stokes  $\vec{S}$ .

La troisième étape est le calcul des angles  $\theta$  et  $\phi$  déjà définis au début de cette sous-section. Le calcul de ces angles est fait à l'aide des équations (4.9) et (4.10).

$$\theta = \cos^{-1}(S_{rot}(:,1)) * \frac{180}{\pi} \quad (4.9)$$

$$\phi = \text{atan2}(S_{rot}(:,3), S_{rot}(:,2)) * \frac{180}{\pi} \quad (4.10)$$

où  $S_{rot}(:,1)$  est le vecteur colonne des valeurs du paramètre  $S_1$  ramené vers l'axe [1,0,0] par la matrice de rotation R,  $S_{rot}(:,2)$  est le vecteur colonne des valeurs du paramètre  $S_2$  ramené vers l'axe [1,0,0] par la matrice de rotation R et  $S_{rot}(:,3)$  est le vecteur colonne des valeurs du paramètre  $S_3$  ramené vers l'axe [1,0,0] par la matrice de rotation R.

La quatrième étape est de construire les histogrammes 3D des angles  $\theta$  et  $\phi$ . Ils ont été tracés par le script MATLAB développé *display\_results* présenté à l'ANNEXE XII. Deux des histogrammes sont présentés à la Figure 4.8, les autres sont placés à l'ANNEXE XIII.

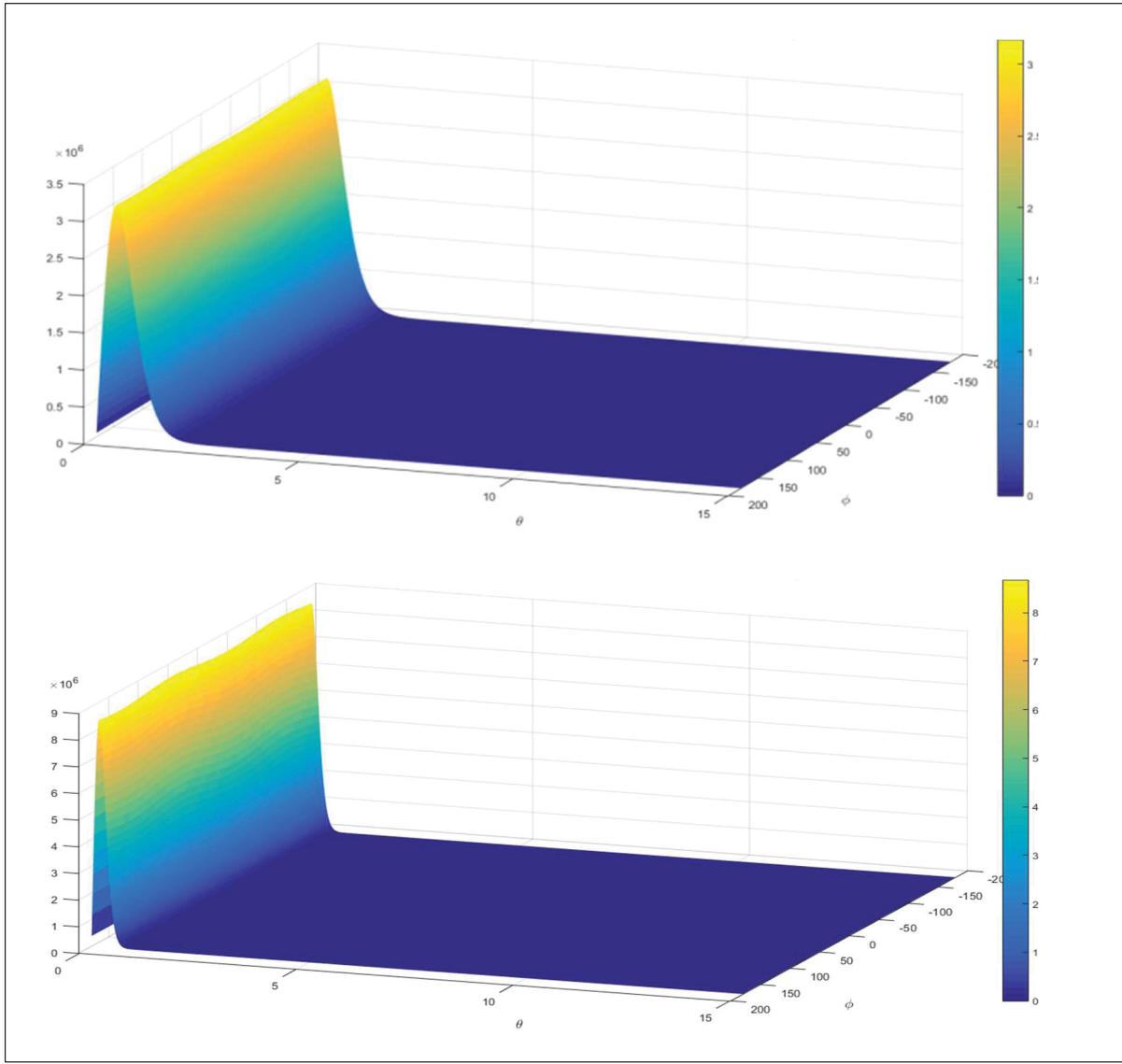


Figure 4.8 Distribution joint des angles  $\theta$  et  $\phi$  pour un filtre de suivi de bande passante de 1 kHz (en haut) et de 6 kHz (en bas)

La Figure 4.8 présente la distribution des valeurs des angles  $\theta$  et  $\phi$ . Plus la bande passante du filtre adaptatif est élevée, plus l'histogramme se comprime.

L'objectif de cette sous-section a été de calculer les angles  $\theta$  et  $\phi$  permettant de définir la localisation sur la sphère de Poincaré de l'état de polarisation lorsque survient une erreur de suivi de la polarisation. Tel qu'annoncé à la section 4.3.3.1, l'erreur binaire due à l'erreur

angulaire de suivi de la polarisation prend en compte la localisation de l'état de polarisation au moment de l'erreur de suivi de la polarisation.

#### 4.3.3.3 $\text{SNR}_{\text{LMS}}(\theta, \phi)$

À partir des angles  $\theta$  et  $\phi$  défini dans la section précédente a été déterminé le paramètre SNR introduit par l'erreur de suivi de la polarisation. Ainsi, à chaque instant  $t_i$ ,  $\text{SNR}_{\text{LMS}}(\theta(t_i), \phi(t_i))$  exprime le SNR équivalent introduit par l'erreur de suivi de la polarisation défini par le vecteur  $\vec{E}(t_i)$  ayant les coordonnées sphériques  $[\cos \theta(t_i), \sin \theta(t_i) \cos \phi(t_i), \sin \theta(t_i) \sin \phi(t_i)]$  sur la sphère de Poincaré. Pour un format de constellation donné, les symboles reçus aux récepteurs  $r_x$  et  $r_y$  peuvent s'exprimer par l'équation (4.5).

$$\begin{bmatrix} r_x \\ r_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \exp(i\phi) \\ -\sin \theta \exp(-i\phi) & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_x \\ s_y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_x \\ n_y \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

où  $s_x$  et  $s_y$  sont les symboles reçus au récepteur.  $n_x$  et  $n_y$  représentant le bruit blanc gaussien additif introduit par ASE. Pour des valeurs angles  $\theta$  et  $\phi$  données, le SNR requis (*required SNR*, RSNR),  $\text{RSNR}(\theta, \phi)$ , peut être déterminé pour un BER donné.  $\text{SNR}_{\text{LMS}}(\theta, \phi)$ , pour un BER visé, est défini comme étant la réciproque entre  $\text{RSNR}(\theta, \phi)$  et le  $\text{RSNR}_{B2B}$  (*back-to-back RSNR*) et s'exprime comme suit :

$$\frac{1}{\text{SNR}_{\text{LMS}}(\theta, \phi)} = \frac{1}{\text{RSNR}_{B2B}} - \frac{1}{\text{RSNR}(\theta, \phi)} \quad (4.12)$$

Dans l'analyse, le format de modulation QPSK avec un seuil BER de 0,035 a été choisi. Sur la base de l'équation (4.6), une table MATLAB de consultation (*lookup table*) (Crawford et al., 2015), illustrée par la Figure 4.9, a été générée. Cette table est constituée de deux vecteurs ligne *list\_phi* (1 x 31) et *list\_theta* (1 x 26) des valeurs de  $\phi$  et  $\theta$  allant respectivement

de 0 à  $360^\circ$  et de 0 à  $25^\circ$ , et une matrice  $\text{SNR\_UNTRACKED\_dB}$  (26X31) des valeurs de SNR en dB correspondant à chacune des valeurs des angles de  $\theta$  et  $\phi$ . Cette table obtenue par le script MATLAB *plot\_untracked\_snr\_qpsk0035* (Crawford et al., 2015) est présentée à l'ANNEXE XIV. Le tracé résultant est présenté à la Figure 4.10 et montre la relation entre les angles  $\theta$  et  $\phi$  et la valeur du  $SNR_{LMS}$  en décibel (dB) sur la base de l'équation (4.6).

Name	Value
errRateTarget	0.0350
List_Phi	1x31 double
List_Theta	1x26 double
SNR_UNTRACKED_dB	26x31 double

Figure 4.9 Table lookup de  $SNR_{LMS}(\theta, \phi)$  pour la modulation QPSK avec un seuil BER de 0,035

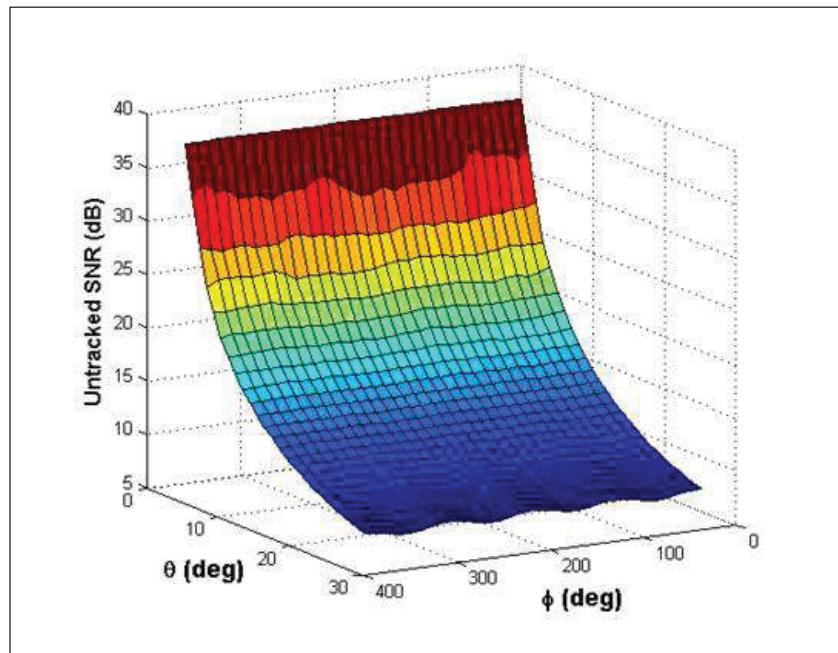


Figure 4.10 Table de correspondance entre  $\theta$  et  $\phi$  et erreur de suivi (pour la modulation QPSK avec un seuil BER de 0,035)

À la Figure 4.10, on observe que le minimum de  $\text{SNR}_{\text{LMS}}$  est de 6,4875 dB pour un angle  $\theta$  de 25 ° et un angle  $\phi$  de 48°. Le maximum de  $\text{SNR}_{\text{LMS}}$  est de 38,8075 dB pour un angle  $\theta$  de 0 ° quelles que soient les valeurs de  $\phi$ . De cela, il peut être constaté que l'angle  $\theta$  est le paramètre le plus critique influençant le SNR dans le cas d'une erreur de suivi de la polarisation. Plus petite est la différence angulaire entre l'état de polarisation effectif et l'état de polarisation mesuré par le récepteur, moins grand est l'impact sur la qualité du signal à la réception.

À partir de valeurs de  $\text{SNR}_{\text{LMS}}(\theta, \phi)$  obtenues, les histogrammes construits pour chaque valeur de bande passante sont présentés dans la sous-section suivante.

#### 4.3.3.4 Histogramme des $\text{SNR}_{\text{LMS}}(\theta, \phi)$

Les étapes pour obtenir l'histogramme des  $\text{SNR}_{\text{LMS}}(\theta, \phi)$  sont présentées à la Figure 4.11.

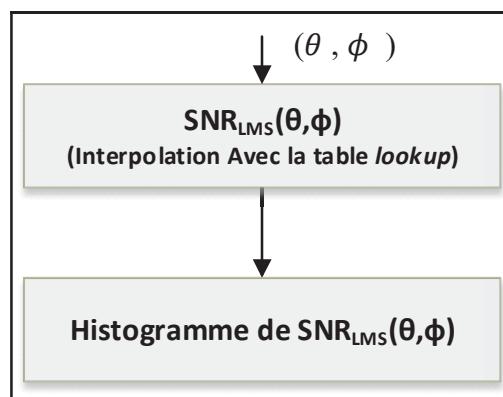


Figure 4.11 Diagramme du processus de calcul de l'histogramme des  $\text{SNR}_{\text{LMS}}(\theta, \phi)$

Pour chaque instant  $t$ , il a été utilisé la table *lookup*  $\text{SNR}_{\text{LMS}}(\theta, \phi)$  présenté à la sous-section précédente 4.3.3.3 et les angles  $\theta(t)$  et  $\phi(t)$  présenté à la sous-section 4.3.3.2 pour faire une interpolation afin d'obtenir la valeur de  $\text{SNR}_{\text{LMS}}(\theta, \phi)$  pour les valeurs d'angles non présentes dans la table *lookup*. La fonction interne à MATLAB *interp2* a été utilisée pour cette interpolation. Le calcul des histogrammes est présenté dans la fin du script MATLAB développé *pola\_processing\_PolTrack\_sub\_worker* et présenté à ANNEXE X.

Les histogrammes de  $\text{SNR}_{\text{LMS}}(\theta, \phi)$  ont été tracés par le script MATLAB développé *display\_results* présenté à l'ANNEXE XII. Deux des histogrammes sont présentés à la Figure 4.12, les autres sont placés à l'ANNEXE XV. L'analyse des histogrammes révèle que, pour un SNR de 10 dB après considération de toutes les pénalités, un récepteur avec une bande passante B de 1 kHz a une probabilité de bits d'erreur plus élevée qu'un récepteur à 6 kHz.

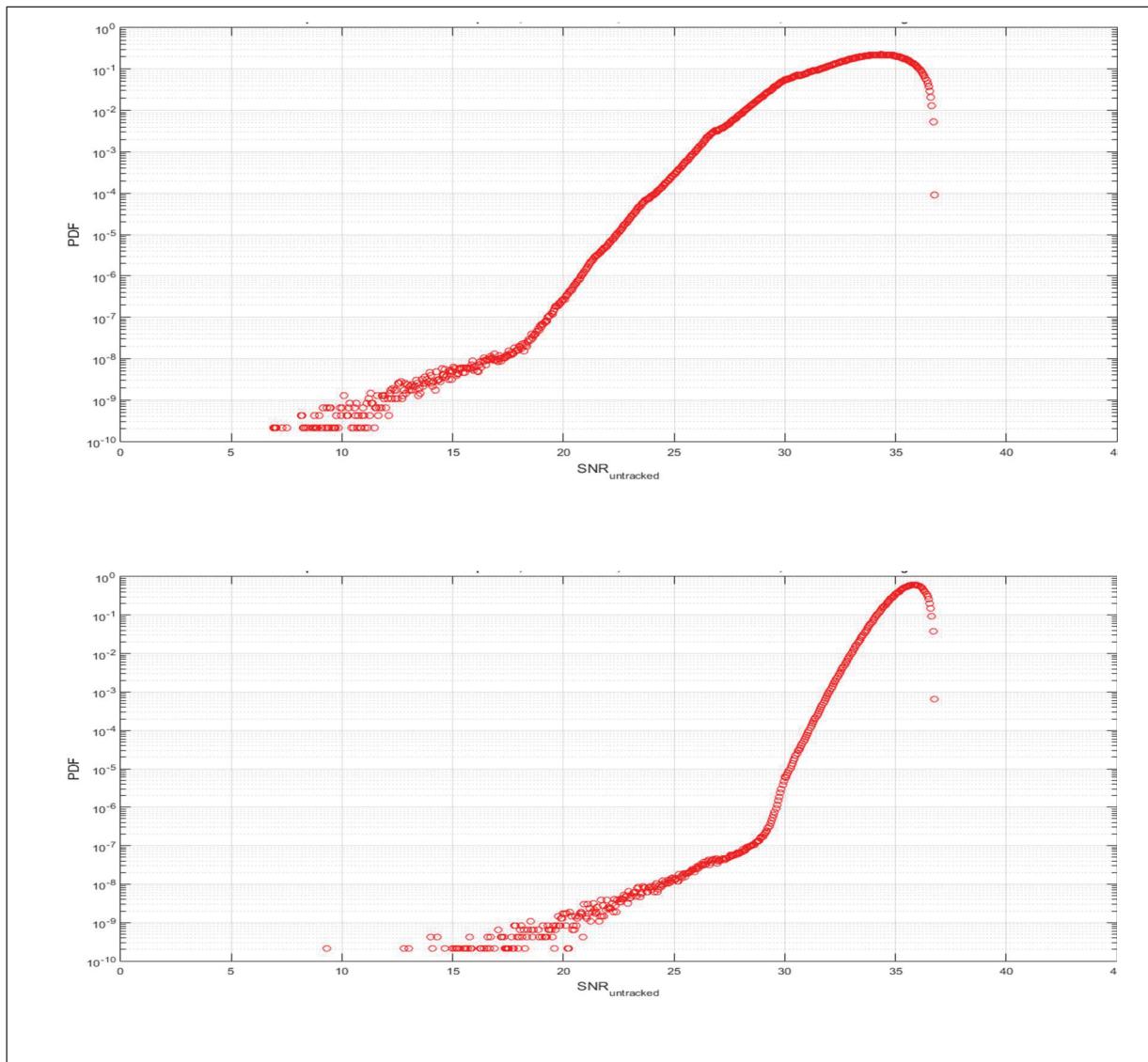


Figure 4.12 Histogramme des  $\text{SNR}_{\text{LMS}}(\theta, \phi)$  pour un filtre de suivi de bande passante de 1 kHz (en haut) et de 6 kHz (en bas)

Selon la bande passante, l'histogramme montre comment chaque valeur de  $\text{SNR}_{\text{untracked}}(\theta, \phi)$  survient dans la liaison. L'histogramme de  $\text{SNR}_{\text{LMS}}$  devient plus étroit à mesure que la bande passante augmente, comme l'angle  $\theta$  devient plus petit. Par contre, lorsque la bande passante est limitée, des valeurs de l'angle  $\theta$ , et des  $\text{SNR}_{\text{untracked}}$  plus élevées sont possibles.

#### 4.3.3.5 Histogramme des $\text{NSR}_{\text{LMS}}$

Le paramètre  $\text{NSR}_{\text{LMS}}$  est la réciproque de  $\text{SNR}_{\text{LMS}}$  en unité linéaire. La Figure 4.13 décrit le processus de calcul de  $\text{NSR}_{\text{LMS}}$ . La première étape est de convertir les valeurs de la matrice  $\text{SNR}_{\text{LMS}}(\theta, \phi)$  défini dans la sous-section précédente en unité linéaire. Ensuite, il faut constituer la matrice  $\text{NSR}_{\text{LMS}}$  des inverses des valeurs de  $\text{SNR}_{\text{LMS}}$ . La fonction *histc* interne à MATLAB a permis de calculer histogramme de  $\text{NSR}_{\text{LMS}}$ . Le calcul des histogrammes est présenté à la fin du script MATLAB développé *pola\_processing\_PolTrack\_sub\_worker* et présenté à ANNEXE X. Les histogrammes de  $\text{NSR}_{\text{LMS}}$  ont été tracés par le script MATLAB développé *display\_results* présenté à l'ANNEXE XII. Deux des histogrammes sont présentés à la Figure 4.14, les autres sont placés à l'ANNEXE XVI.

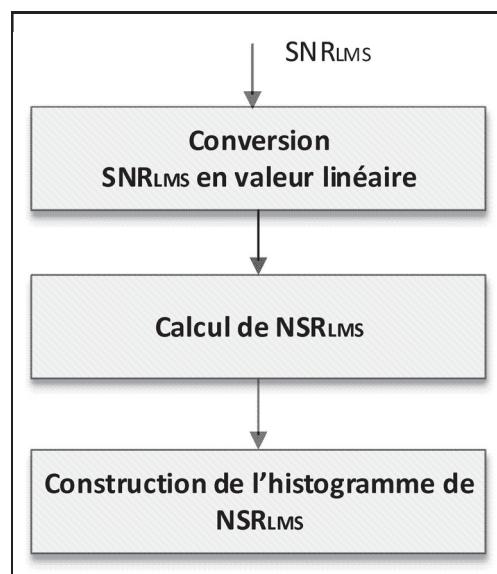


Figure 4.13 Diagramme de calcul de  $\text{NSR}_{\text{LMS}}$

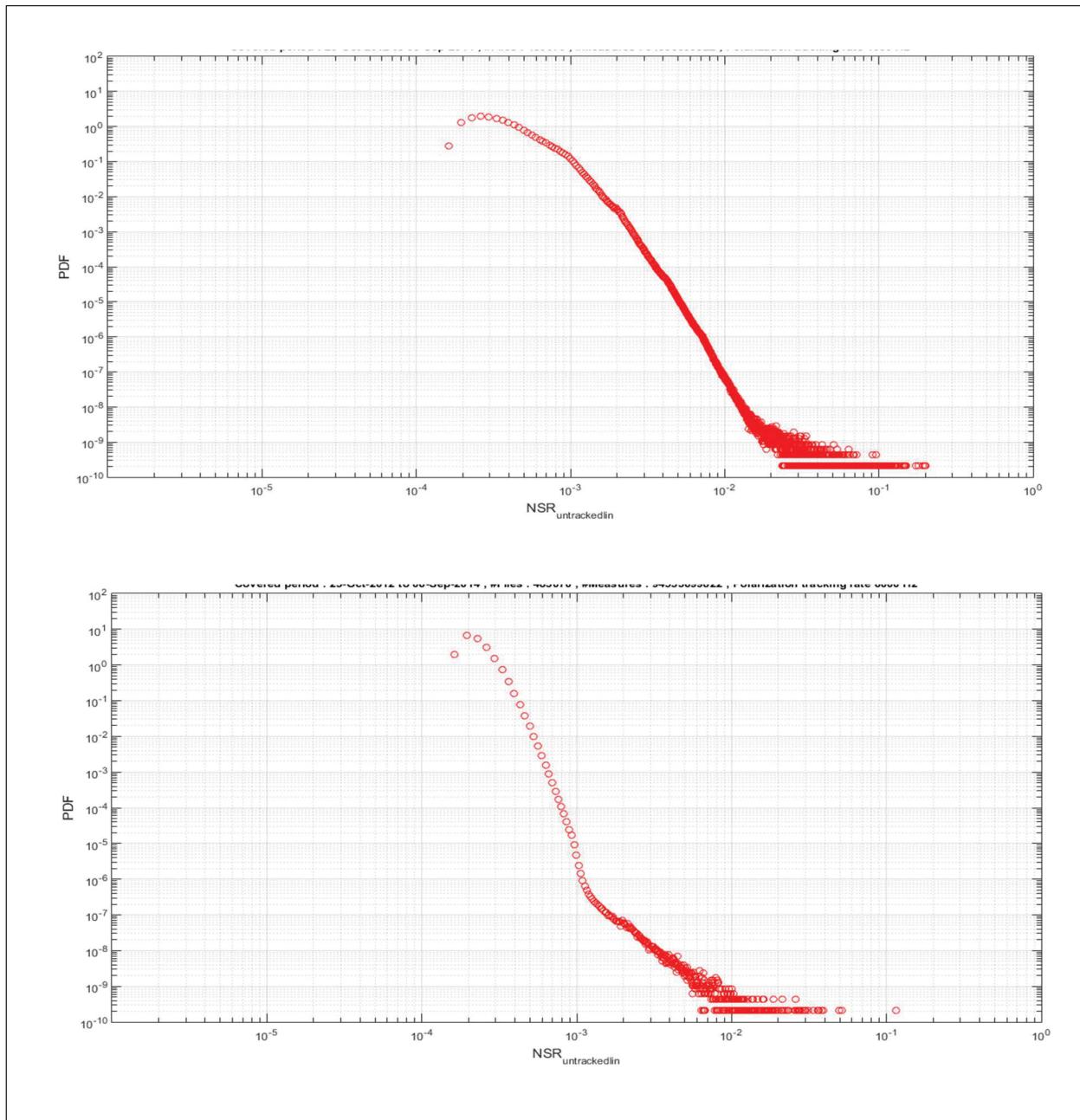


Figure 4.14 Histogramme des  $NSR_{LMS}$  pour un filtre de suivi de bande passante de 1 kHz(en haut) et 6 kHz (en bas)

#### 4.3.3.6 Distribution de probabilité cumulative complémentaire de $NSR_{LMS}$

La distribution de probabilité cumulative complémentaire (*complementary cumulative distribution, CCD*) de  $NSR_{LMS}$  a été calculée afin de mieux comprendre la probabilité que le  $NSR_{LMS}$  excède un certain seuil donné. La fonction de CCD est décrite à l'équation (4.13).

$$ccdf(x) = \int_x^{\infty} pdf(z) dz \quad (4.13)$$

Le processus d'obtention de la Figure 4.16 est montré dans le diagramme de la Figure 4.15. Dans ce diagramme, les variables  $x_i$  sont les différents seuils de  $NSR_{LMS}$ , avec  $x_i$  variant de  $1,9965 \times 10^{-4}$  à 0.2108. À chaque intégrale de l'histogramme de  $NSR_{LMS}$  selon l'équation (4.13), il est obtenu un point à un certain seuil  $x_i$ . Le graphe de la Figure 4.16 est l'ensemble de ces points pour chaque bande passante B.

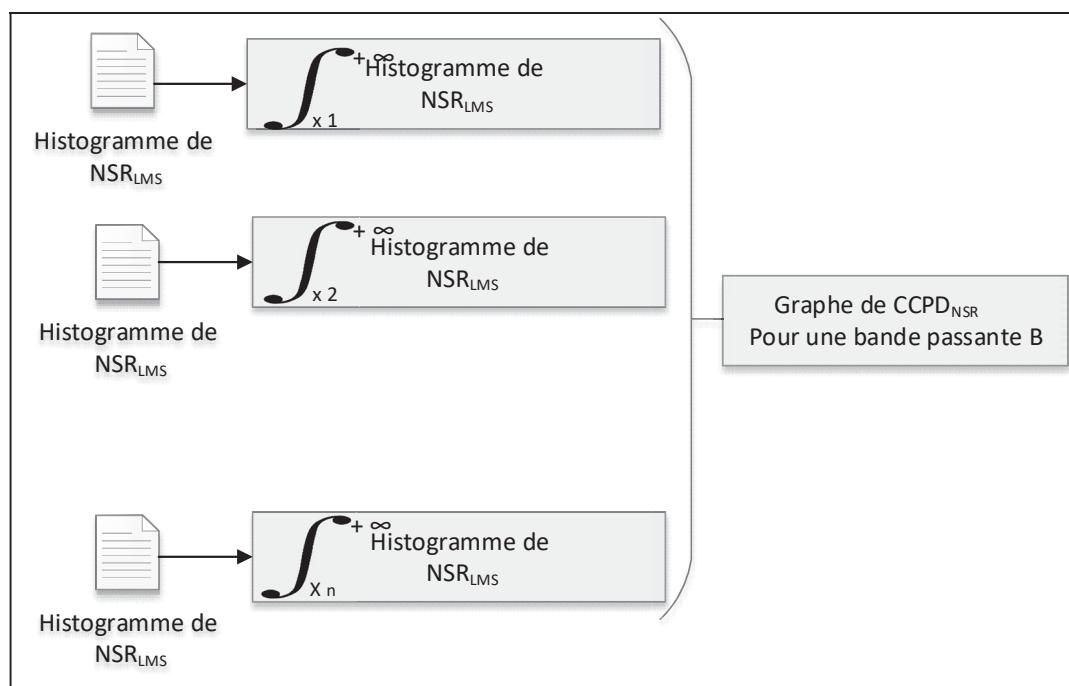


Figure 4.15 Diagramme de calcul de distribution de probabilité cumulative complémentaire de  $NSR_{LMS}$  pour une bande passante B du filtre adaptatif

Le script MATLAB *script-CPD* développé pour cette intégration est présenté à l'ANNEXE XVII et le script MATLAB *Display\_Multilines\_script\_CPD* développé pour le tracé est présenté à l'ANNEXE XVIII.

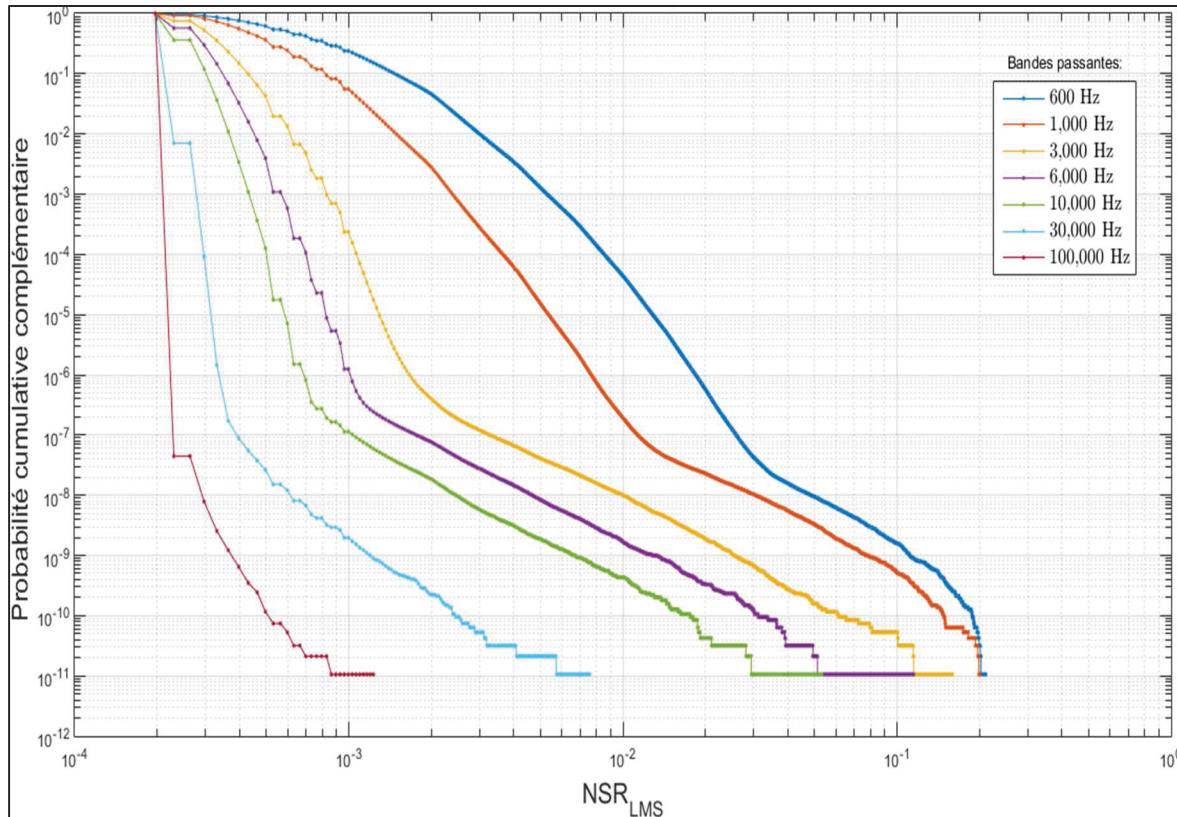


Figure 4.16 Distribution de probabilité cumulative complémentaire de  $NSR_{LMS}$  pour différentes valeurs de bande passante du filtre adaptatif

Le résultat de cette analyse pourrait servir à déterminer la bande passante requise du filtre adaptatif pour satisfaire aux spécifications de qualité de transmission d'une liaison donnée. Mais aussi elle servirait à trouver un compromis entre la plus large bande passante possible pour avoir la plus faible probabilité d'excéder un certain seuil de NSR. En outre, pour un récepteur existant doté d'une bande passante donnée, cette analyse servirait à indiquer la probabilité que la valeur du NSR engendrée par l'erreur de suivi de la polarisation excède un certain seuil de NSR. Une illustration est montrée dans le Tableau 4.1.

Tableau 4.1 Probabilité que le  $\text{NSR}_{\text{LMS}}$  excède  $10^{-3}$  pour différentes valeurs de bande passante du filtre adaptatif

<b>Bandé passante (kHz)</b>	<b>Probabilité <math>\text{NSR}_{\text{LMS}} &gt; 10^{-3}</math></b>
0,6	0,2236
1	0,486
3	$1,56 \times 10^{-4}$
6	$7,72 \times 10^{-7}$
10	$1,02 \times 10^{-7}$
30	$1,71 \times 10^{-9}$
100	$1,06 \times 10^{-11}$

#### 4.4 Conclusion

Ce chapitre a présenté les techniques utilisées pour estimer et compenser la CD, la PMD et pour suivre la polarisation dans un récepteur cohérent. Le plus grand défi d'un récepteur cohérent est son niveau de tolérance aux grandes variations de la polarisation, défi à la base de ce projet de caractérisation des effets de polarisation dans des liaisons optiques cohérentes. Ce chapitre a montré l'impact de la bande passante du filtre adaptatif sur l'erreur engendrée par une erreur de suivi de la polarisation. Il en ressort que plus grande est la bande passante du filtre adaptatif, plus petite est l'erreur de suivi angulaire. Par exemple, pour un filtre ayant une bande passante de 600 Hz, la moyenne de l'erreur angulaire de suivi de la polarisation est de  $0,962^\circ$  avec un écart-type de 0,499. Pour un filtre ayant une bande passante de 1 kHz, la moyenne de l'erreur angulaire de suivi de la polarisation est de  $0,637^\circ$  avec un écart-type de 0,332°. Pour un filtre ayant une bande passante de 6 kHz, la moyenne de l'erreur angulaire de suivi de la polarisation est de  $0,330^\circ$  avec un écart-type de  $0,175^\circ$ . En outre, plus la largeur de la bande passante du filtre adaptatif est élevée, moins grand est l'impact du bruit sur le signal. Ainsi la probabilité que le NSR excède  $10^{-3}$  est de 0,486 pour une bande passante de 1 kHz et de  $7,72 \times 10^{-7}$  pour une bande passante de 6 kHz.



## CONCLUSION

Ce projet de maîtrise a permis de réaliser différentes analyses statistiques des effets de polarisation observés dans une liaison optique cohérente aérienne à 40 Gbit/s et une liaison optique cohérente enfouie à 100 Gbit/s à partir des mesures de monitoring effectuées à l'aide de polarimètres et de transpondeurs cohérents. La durée des périodes de monitoring, les outils utilisés ainsi que l'aspect commercial des liaisons optiques étudiées permettent d'apporter des connaissances pratiques sur les effets de polarisation dans les liaisons optiques cohérentes selon les conditions de déploiement.

En premier lieu, la contribution de ce projet a été de poursuivre les analyses effectuées par Brugièvre (2015) des effets de polarisation observés dans une liaison optique aérienne au moyen d'un polarimètre, cette fois avec un changement du seuil de détection des événements de polarisation de 0,9 rad/ms à 1,27 rad/ms. Cette première contribution à conduit à la publication d'un article de conférence dans le cadre de la conférence internationale la plus importante dans le domaine des communications optiques (OFC) (Brugièvre et al., 2016). En deuxième lieu, la contribution de ce projet a été d'adapter les scripts développés par Brugièvre (2015) afin de traiter et d'analyser les données provenant d'un transpondeur cohérent à 100 Gbit/s et d'un polarimètre plus rapide. En troisième lieu, la contribution de ce projet a été de fournir une synthèse des études réalisées jusqu'ici dans le projet de monitoring menées par le *Laboratoire de technologies de réseaux* (ÉTS) en partenariat avec Ciena et un fournisseur de services nord-américain. En quatrième lieu, la contribution de ce projet a été de fournir une analyse sur l'erreur de suivi de l'état de polarisation d'un transpondeur cohérent.

L'analyse des mesures effectuées par le polarimètre sur la liaison optique cohérente aérienne à 40 Gbit/s a permis de répertorier un certain nombre d'événements de monitoring dont le plus rapide avait une vitesse de rotation de 15,2 rad/ms. Une analyse de corrélation entre les déflections angulaires maximales et les vitesses de rotation du vecteur de Stokes maximales observées lors des événements de polarisation a permis d'observer que les plus grandes vitesses de rotation du vecteur de Stokes n'ont pas les déflections angulaires plus grandes. Ainsi le plus

rapide évènement de polarisation observé à une déflexion angulaire de 0,70 rad. L'analyse statistique sur les intervalles de temps d'arrivée des évènements de polarisation a révélé que sur une période de 2 heures il y a eu une plus grande probabilité que les évènements soient séparés de moins de 6 minutes.

L'analyse des mesures effectuées par le polarimètre sur la liaison optique cohérente enfouie à 100 Gbit/s a permis de répertorier un certain nombre d'évènements de monitoring dont le plus rapide avait une vitesse de rotation de 3,83 rad/ms. Une analyse de la corrélation entre déflexion angulaire maximale et vitesses de rotation maximales du vecteur de Stokes sur cette liaison a révélé que tous les évènements de polarisation observés ont une déflexion angulaire maximale inférieure à 0,5 rad. Le plus rapide évènement de polarisation observé à une déflexion angulaire de 0,0013 rad.

Une analyse comparative de trois liaisons optiques CANARIE, Côte Ouest et Dallas, dont deux enfouies et une aérienne qui ont été monitorées pendant respectivement 37 jours, 22 mois et 6 mois, a montré que les effets de polarisation (SOP, DGD, PDL) sont plus importants sur les liaisons optiques aériennes. En effet, sur la liaison aérienne de la côte ouest les valeurs maximales de PDL, DGD ont été respectivement de 4,46 dB, 15,2 ps avec comme pire cas de BER égal à  $4,58 \times 10^{-6}$ . Sur la liaison enfouie de CANARIE, les valeurs maximales de PDL, DGD ont été respectivement de 1,822 dB et 7,11 ps avec comme pire cas de BER égal à  $10^{-7}$ . Sur la liaison enfouie de CANARIE, les valeurs maximales de PDL, DGD ont été respectivement de 1,051 dB et 3,32 ps avec comme pire cas de BER égal à  $3,4 \times 10^{-6}$  sur la liaison enfouie de Dallas. Notons que dans les trois liaisons, le niveau de performance (BER) du système était largement en dessous de la limite de  $3,8 \times 10^{-3}$ .

Enfin, une étude sur l'erreur de suivi de l'état de polarisation par le transpondeur cohérent a permis d'établir la relation entre la bande passante du filtre adaptatif et l'erreur de suivi de polarisation. Cette étude a montré qu'un transpondeur ayant un filtre adaptatif d'une grande bande passante a une plus petite erreur de suivi de la polarisation. Par exemple, pour un filtre ayant une bande passante de 1 kHz, la moyenne de l'erreur angulaire de suivi de la polarisation

est de  $0,637^\circ$  alors qu'il est de  $0,330^\circ$  pour 6 kHz de bande passante. Cependant, avoir une grande passante du filtre n'est pas une solution optimale. Car plus grande est la bande passante plus complexe est le processus de calcul dans le module ASIC. Ainsi, un compromis peut être fait entre la bande passante du filtre et un seuil du bruit sur signal donné.

### **Limites du mémoire et travaux futurs**

Malgré les contributions de ce mémoire, il est important de noter qu'il reste encore plusieurs analyses qui n'ont pu être couvertes faute de temps. Ainsi, pour les travaux futurs, d'autres analyses pourront être faites afin d'enrichir l'étude des effets dynamiques de polarisation dans les liaisons optiques cohérentes commerciales et la rendre plus complète.

Dans un premier temps, l'analyse des données de monitoring de la liaison de Dallas a été limitée à 6 mois mais, vue la disponibilité des données de monitoring sur 12 mois, l'analyse pourra être poursuivie pour couvrir les 12 mois. Par ailleurs, l'activité de polarisation des liaisons optiques cohérentes monitorées peut être étudiée et être croisée aux données de météo. Aussi le croisement des données du polarimètre et du transpondeur cohérent n'a pas été couvert dans ce mémoire et pourra être fait afin de valider l'habileté du transpondeur cohérent à être utilisé comme un équipement de monitoring des effets de polarisation.

Dans un deuxième temps, la comparaison effectuée dans le chapitre se présente plus comme une synthèse des travaux effectués à ce jour. Mais, pour une réelle comparaison des effets de polarisation sur des liaisons optiques cohérentes, il faudrait comparer des sections ou des liaisons optiques de même type et de longueur comparable.

Dans un troisième temps, pour la modélisation du filtre adaptatif de suivi de la polarisation du transpondeur cohérent, un filtre passe-bas de premier degré a été choisi. Une autre étude pourrait être menée pour savoir si, en dehors de la bande passante du filtre adaptatif, d'autres caractéristiques du filtre telles que son degré pourraient avoir un impact sur la valeur de l'erreur angulaire de suivi de la polarisation et/ou l'erreur binaire engendrée.

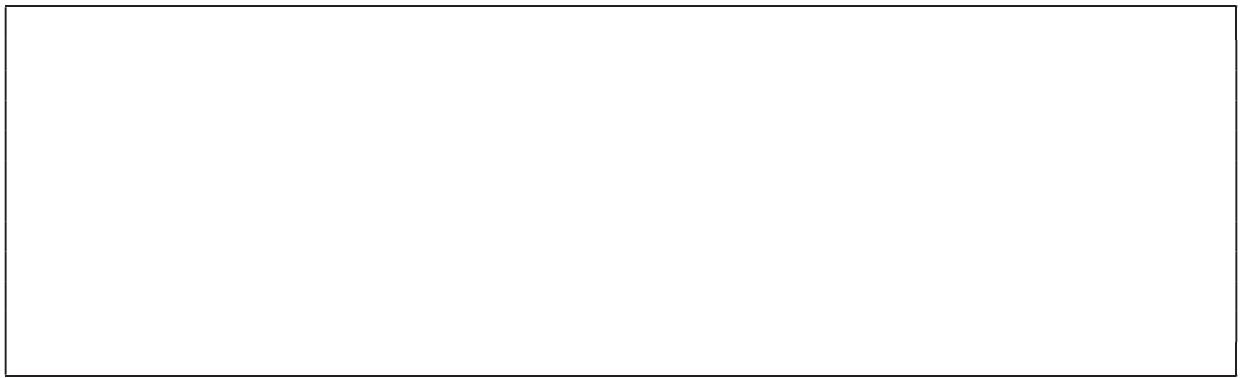


## **ANNEXE I**

### **PARTITIONNEMENT DES FICHIERS DE MESURE POUR LE PROCESSUS DE CALCUL PARALLÈLE DES DONNÉES DU POLARIMÈTRE**

L'Algorithme-A I-1 permet de partager le nombre de fichiers de mesures à traiter selon le nombre d'unité de calcul(nb\_part).

Algorithme -A I-1 Partitionnement des fichiers de mesures pour le processus de calcul



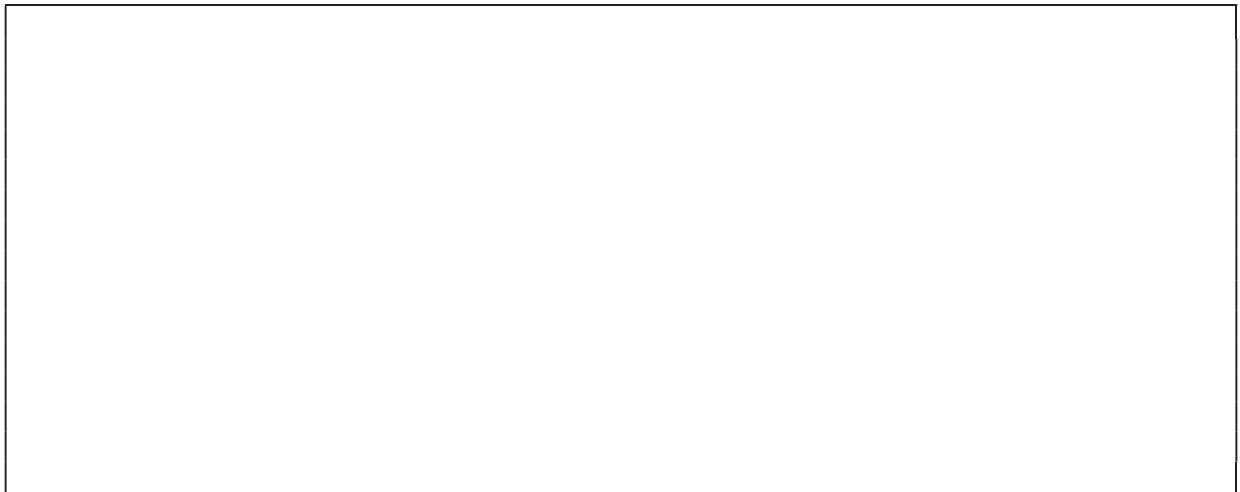


## **ANNEXE II**

### **FORMATION DE LA MATRICE DES VITESSES DE ROTATION DU VECTEUR DE STOKES**

L'Algorithme-A II-1 permet de calculer et de former la matrice des vitesses de rotation pour tous les vecteurs de Stokes mesurées par le polarimètre. L'élément de ce script est le < dt > qui doit être ajusté selon la fréquence d'acquisition du polarimètre utilisée.

Algorithme-A II-1 Formation de la matrice des vitesses de rotation du vecteur de Stokes



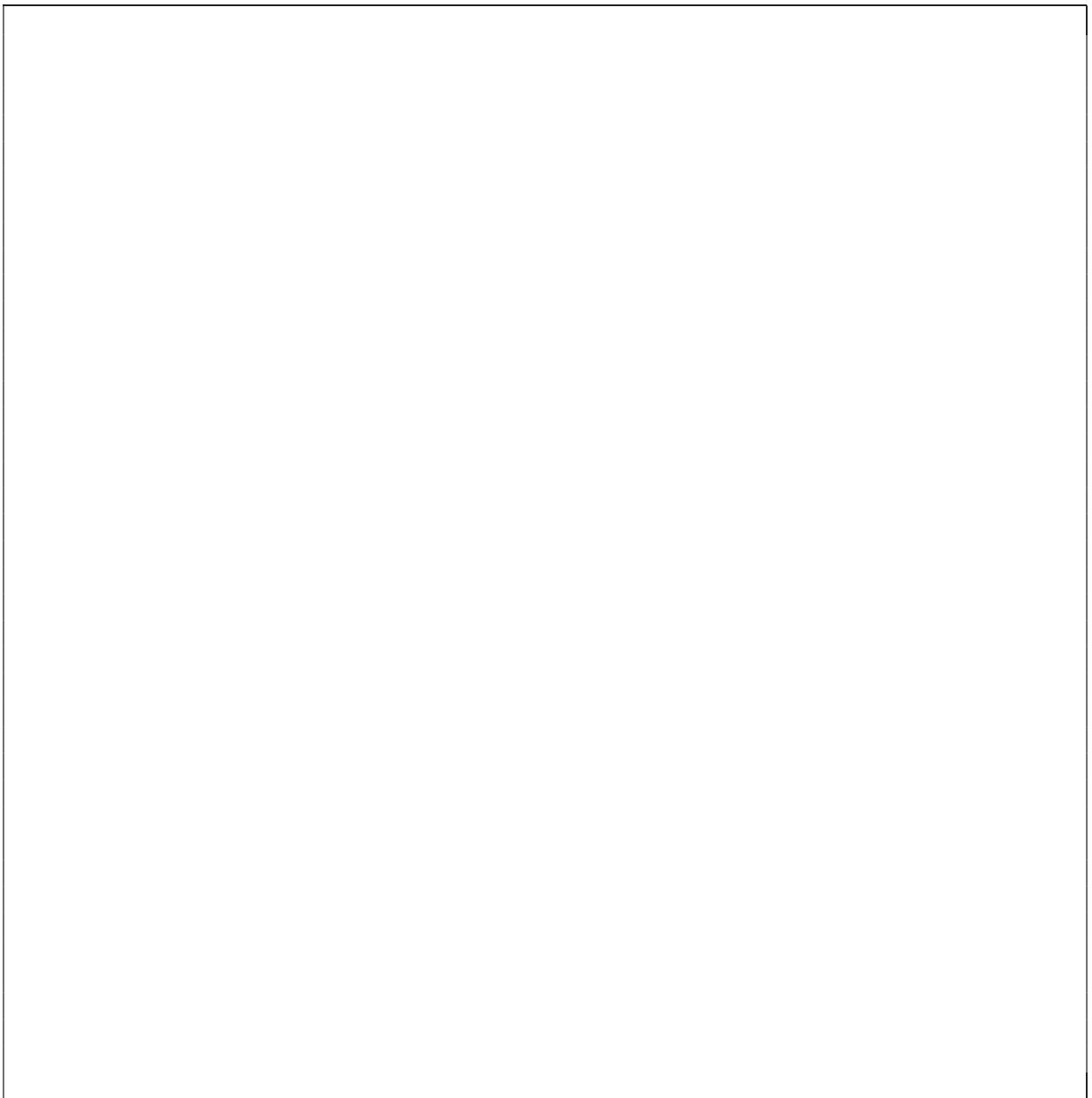


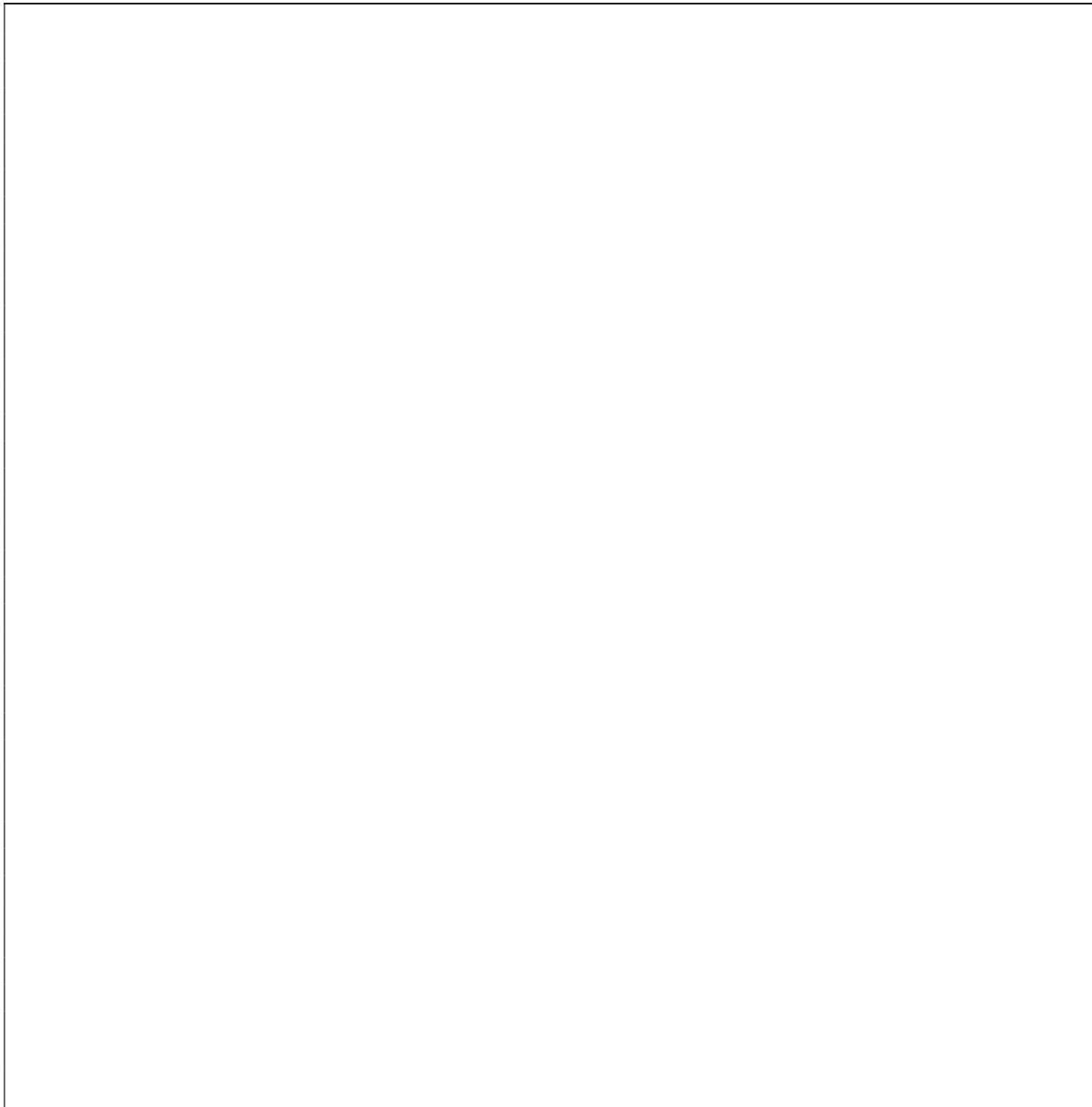
## **ANNEXE III**

### **TRAITEMENT DES DONNÉES DU POLARIMÈTRE 40 G**

L'Algorithme-A III-1 permet le traitement initial des données du polarimètre.

Algorithme-A III-1 Traitement des données du polarimètre 40 G



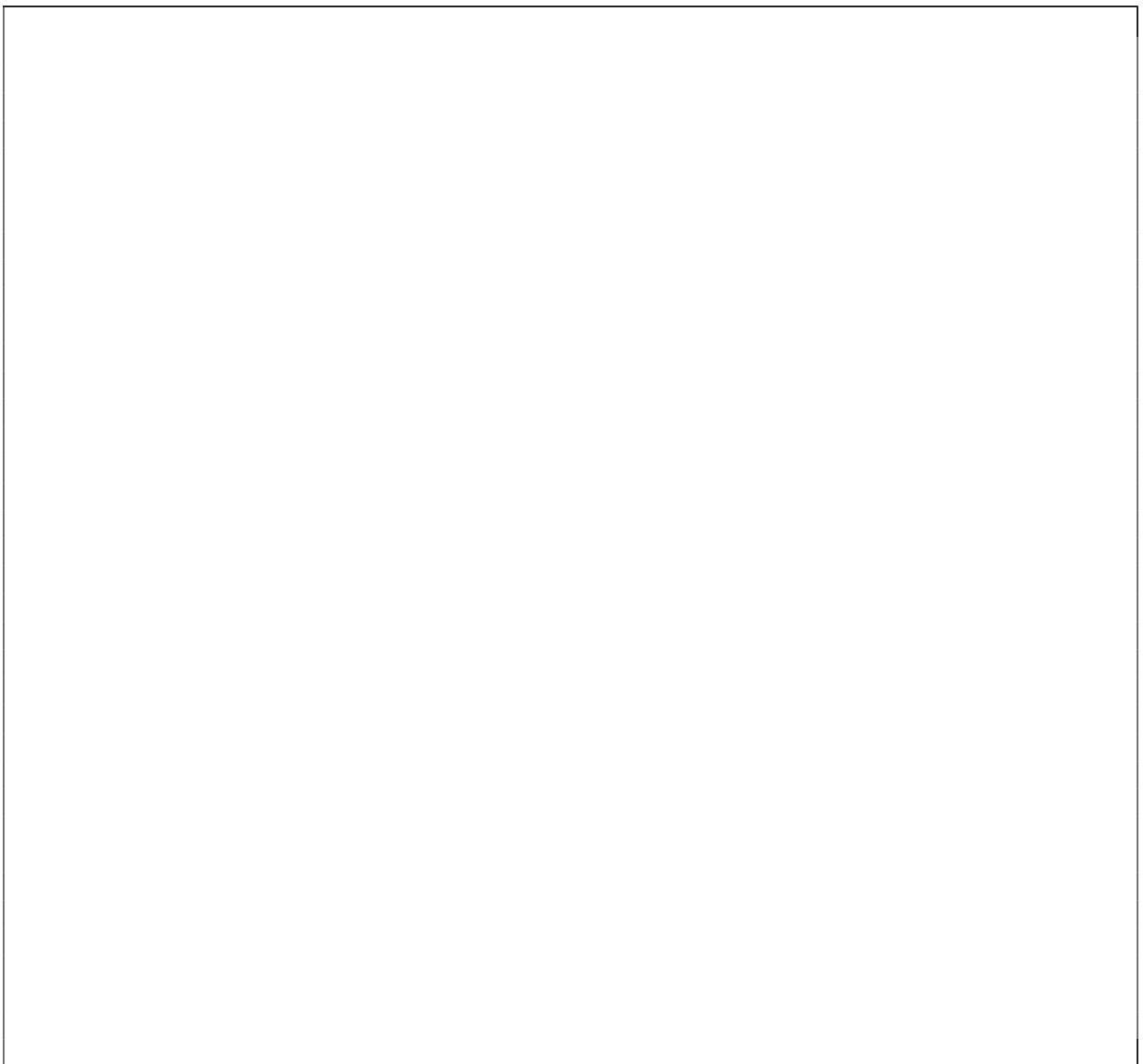


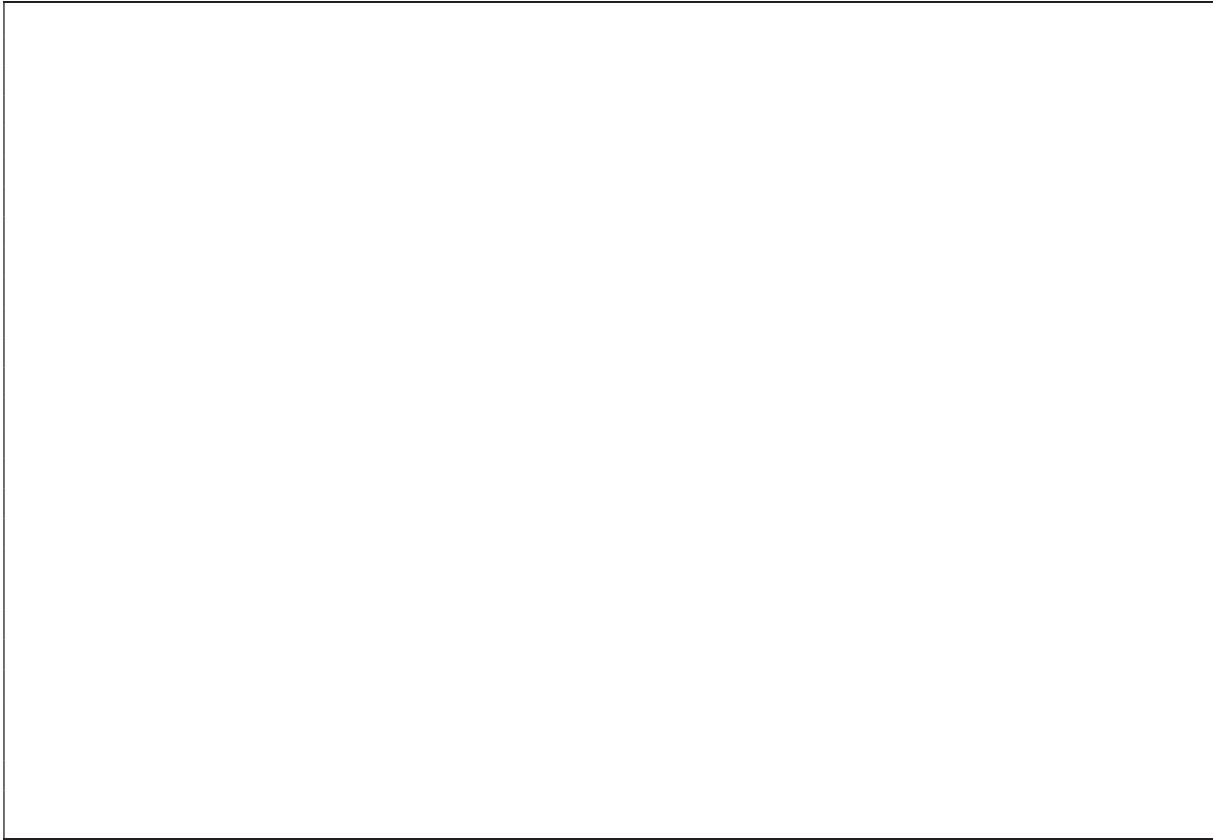
## **ANNEXE IV**

### **DETECTION DES ÉVÈNEMENTS DE POLARISATION**

L'Algorithme-A IV-1 permet de détecter les évènements de polarisation selon les seuils définis (<threshold1> et <threshold2>).

Algorithme-A IV-1 Détection des évènements de polarisation





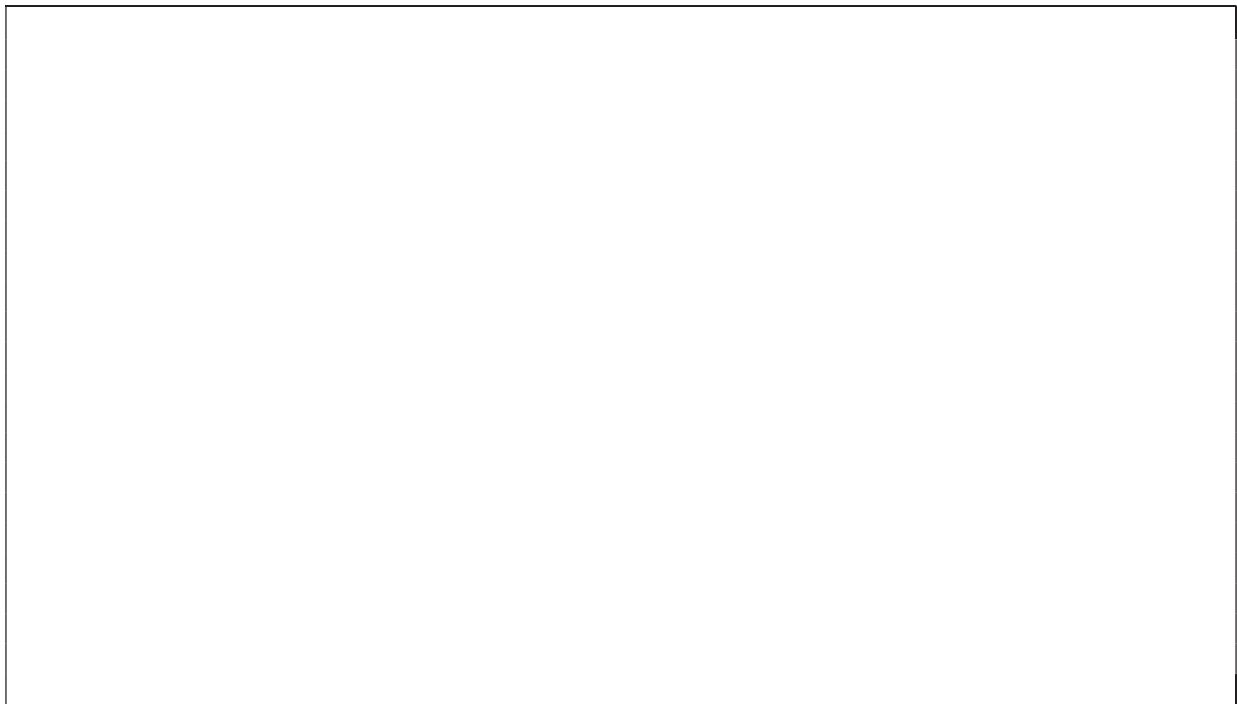
## **ANNEXE V**

### **TRAITEMENT DES DONNÉES DU POLARIMÈTRE 100 G**

Algorithme-A V-1 Script principale du traitement des données du polarimètre 100 G



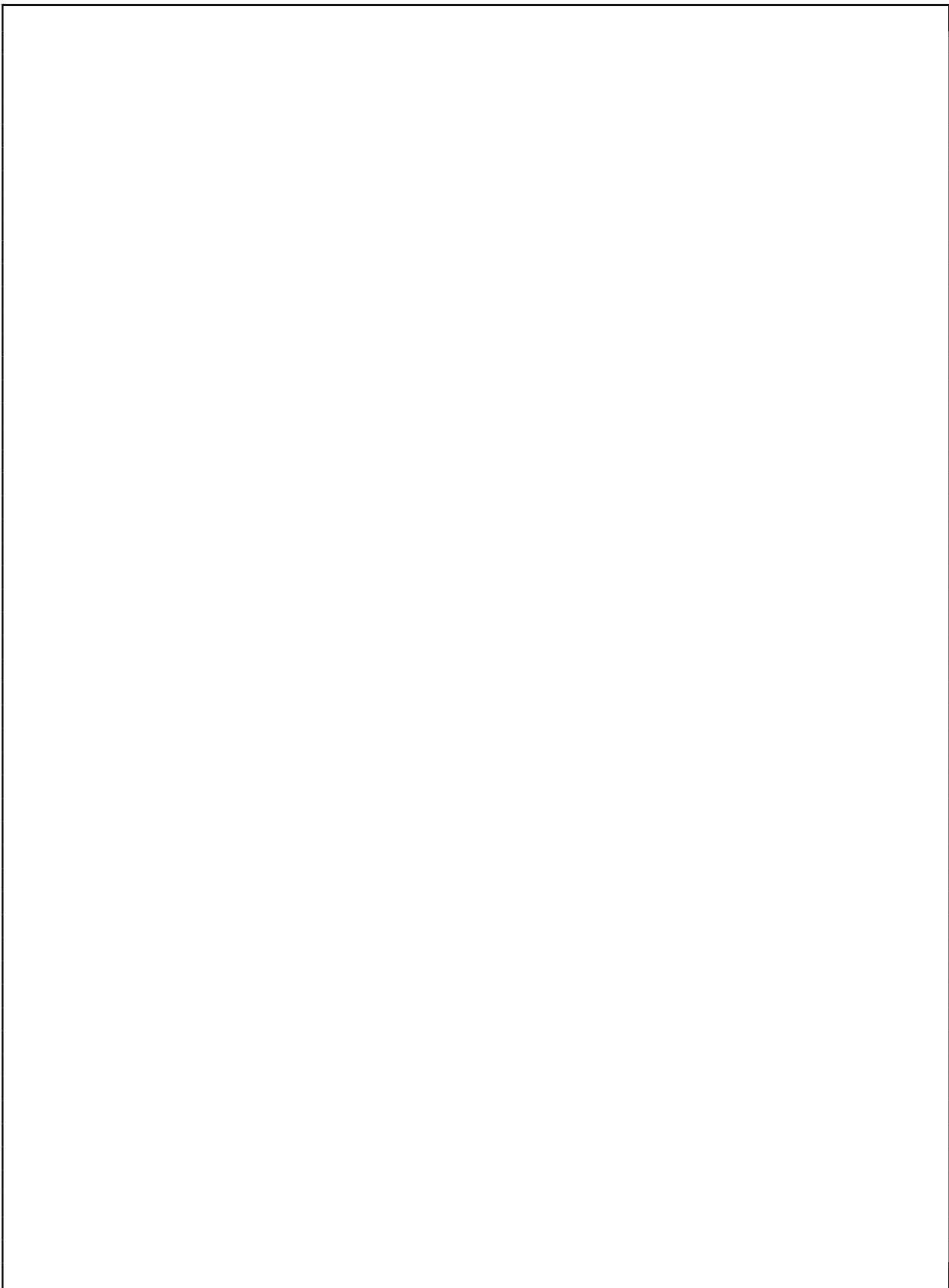
Algorithme-A V-2 Fonction pola\_processing\_ARR





Algorithme-A V-3 Fonction pola\_processing\_ARR\_subworker







## **ANNEXE VI**

### **ESTIMATION DE L'ERREUR DE SUIVI DE LA POLARISATION**

Algorithme-A VI-1 Estimation de l'erreur de suivi angulaire

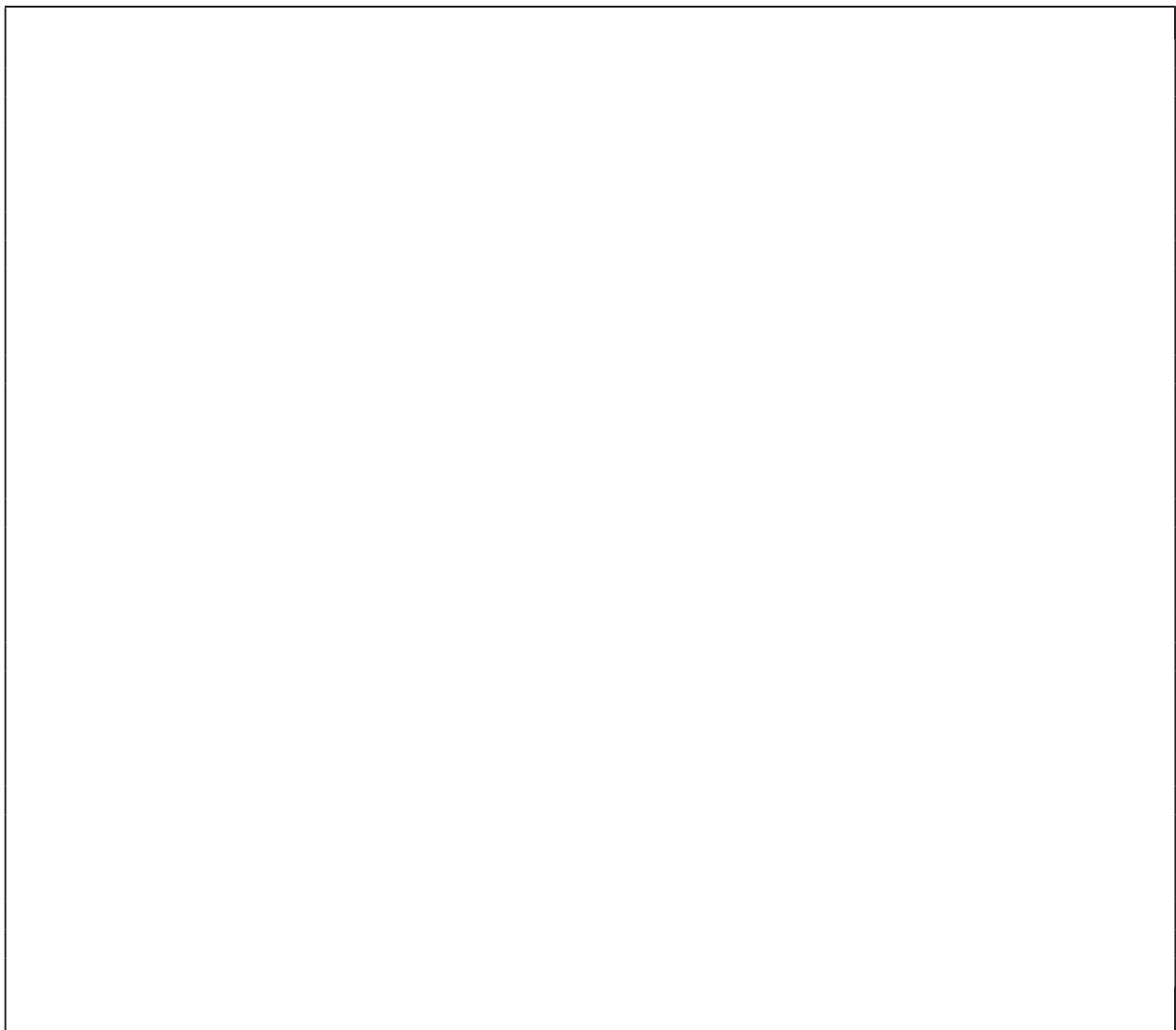




## **ANNEXE VII**

### **TRANSFORMÉE DE FOURIER RAPIDE**

Algorithme-A VII-1 Transformée de fourier rapide



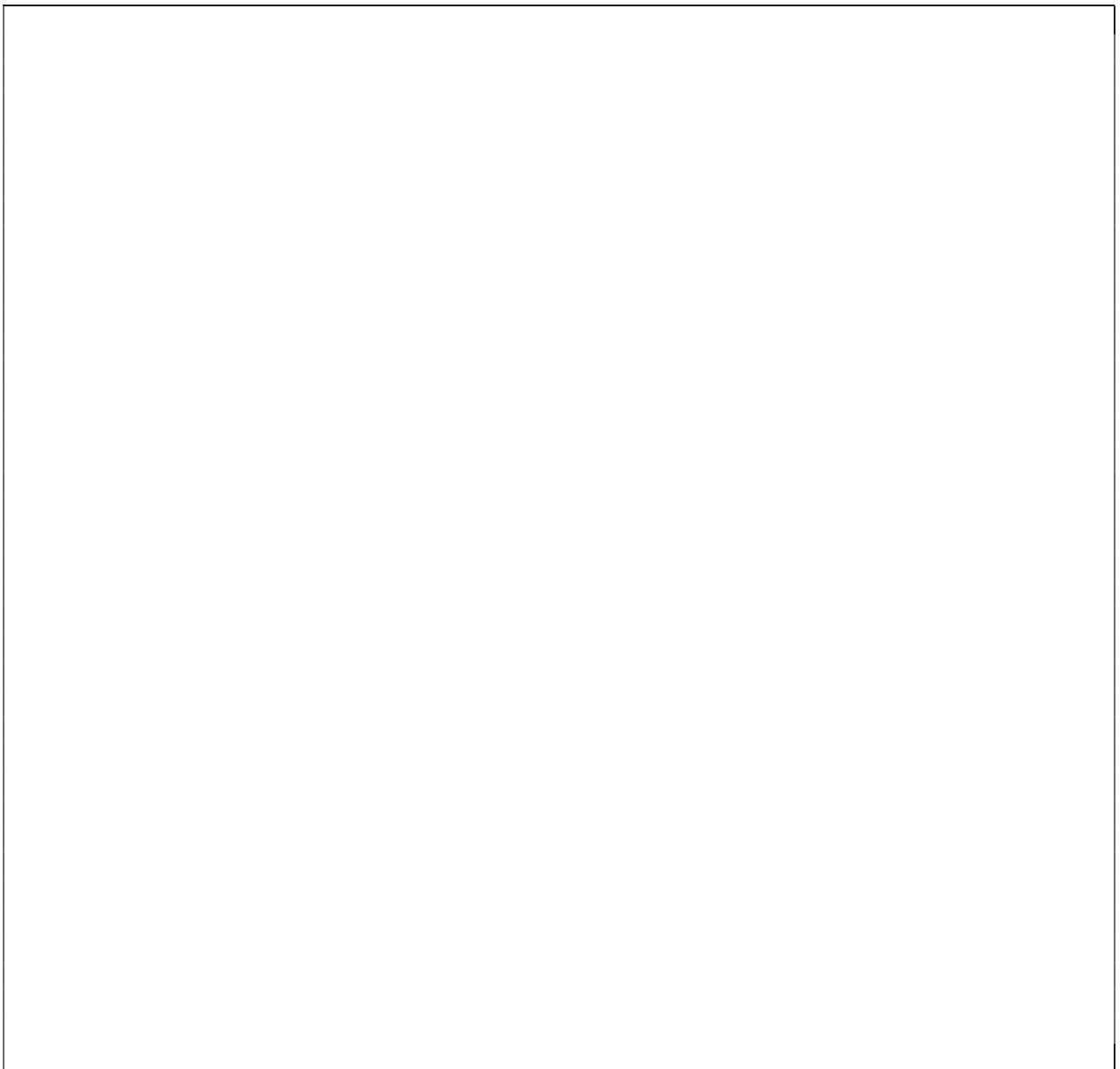


## **ANNEXE VIII**

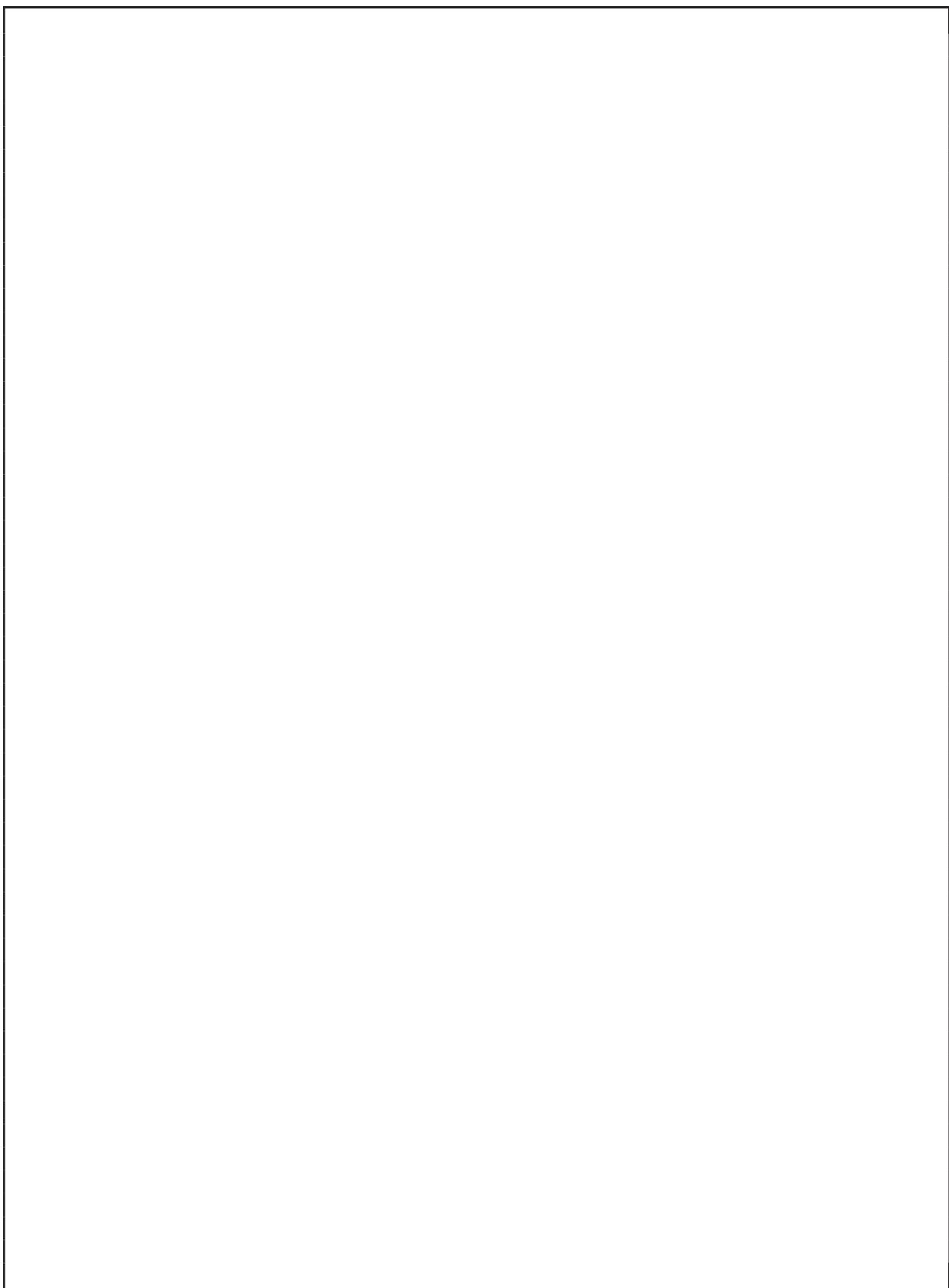
### **TRACÉ D'HISTOGRAMME DE L'ERREUR DE SUIVI DE LA POLARISATION**

L'Algorithme-A VIII-1 permet selon la bande passante < *bandwidth\_filter* > de tracer l'histogramme de l'erreur de suivi de la polarisation

Algorithme-A VIII-1 Tracé d'histogramme de l'erreur de suivi de la polarisation









## **ANNEXE IX**

### **HISTOGRAMMES DE L'ERREUR DE SUIVI DE LA POLARISATION**

Dans le mémoire a été présenté le tracé de l'histogramme pour les bandes passantes B égale à 1kHz et 6 kHz. La figure de cette annexe présente le tracé de l'histogramme pour les différentes valeurs de B.

B=600 Hz

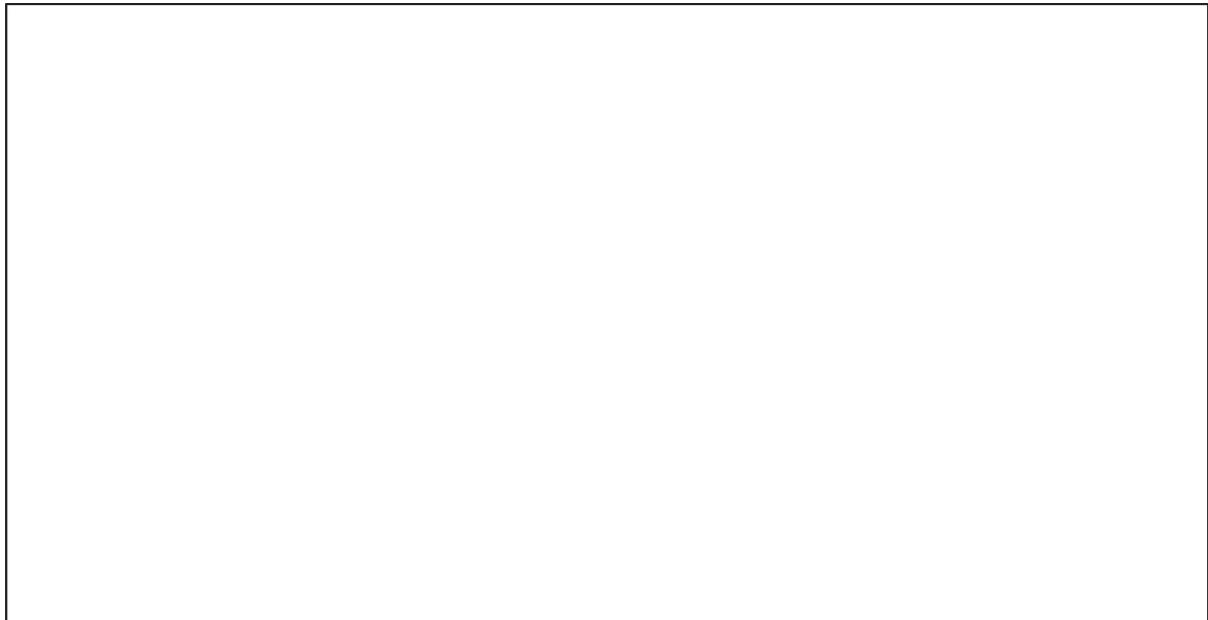


Figure-A IX-1 Histogramme des erreurs de suivi angulaire pour un filtre de suivi de bande passante de 600 Hz

B=3 kHz



Figure-A IX-2 Histogramme des erreurs de suivi angulaire pour un filtre de suivi de bande passante de 3 kHz

B= 10 kHz

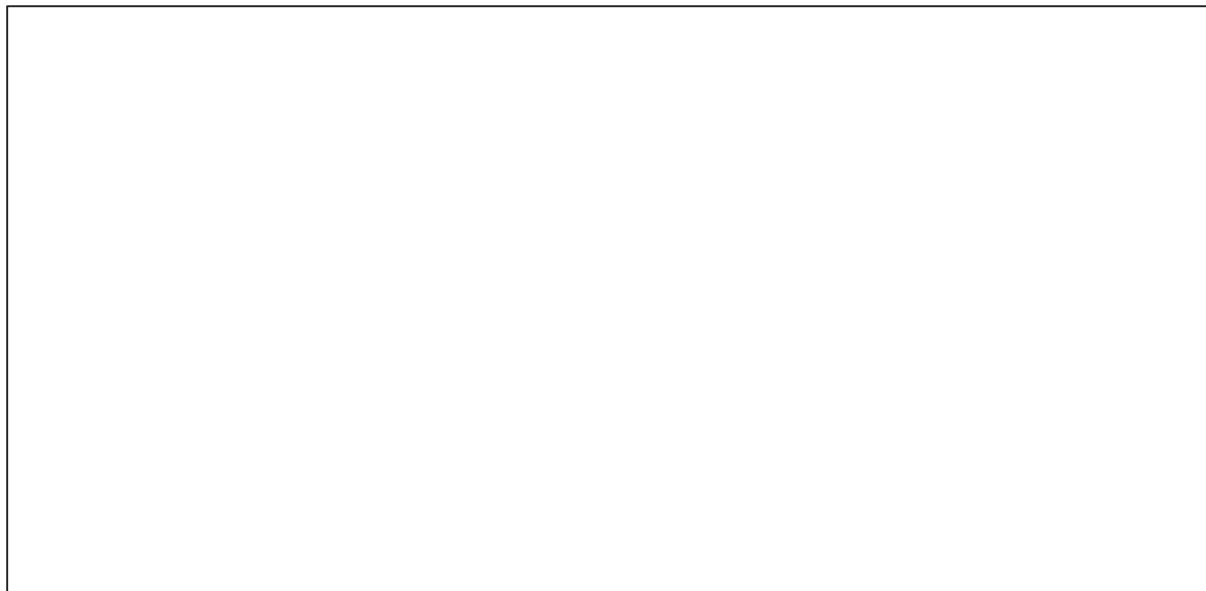


Figure-A IX-3 Histogramme des erreurs de suivi angulaire pour un filtre de suivi de bande passante de 10 kHz

B= 30 kHz

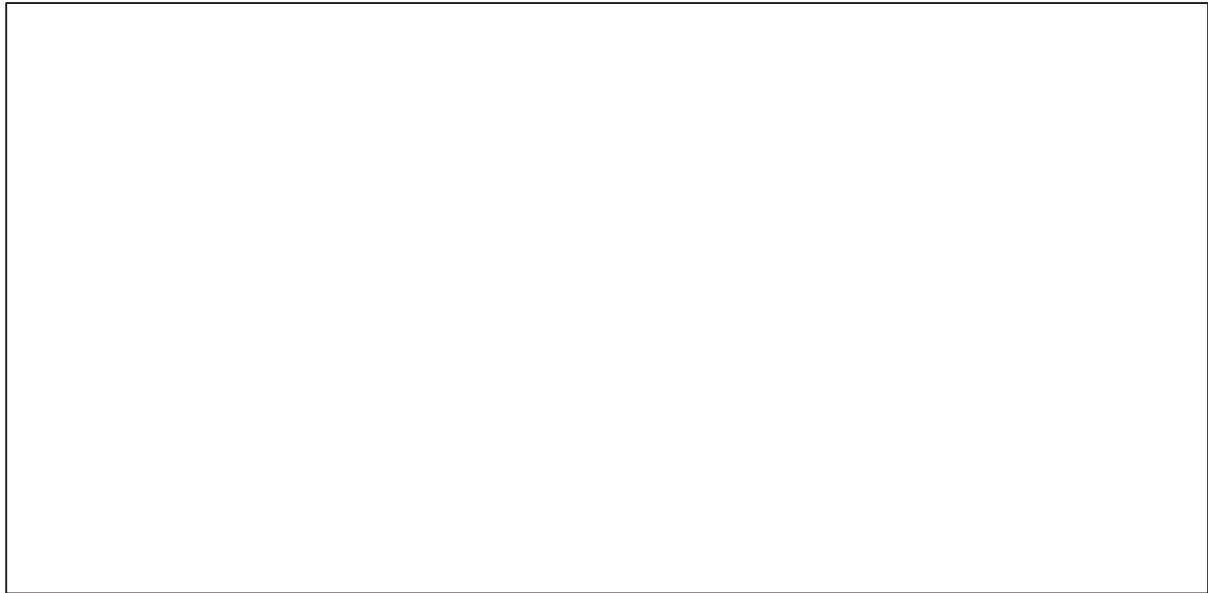


Figure-A IX-4 Histogramme des erreurs de suivi angulaire pour un filtre de suivi de bande passante de 30 kHz

B= 100 KHz

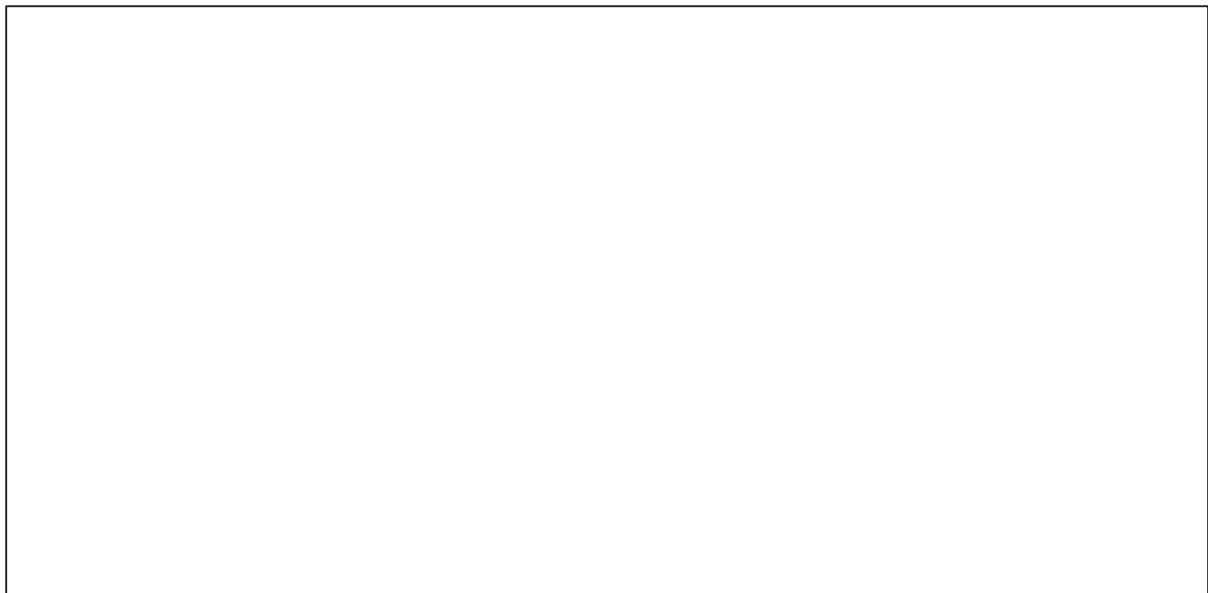


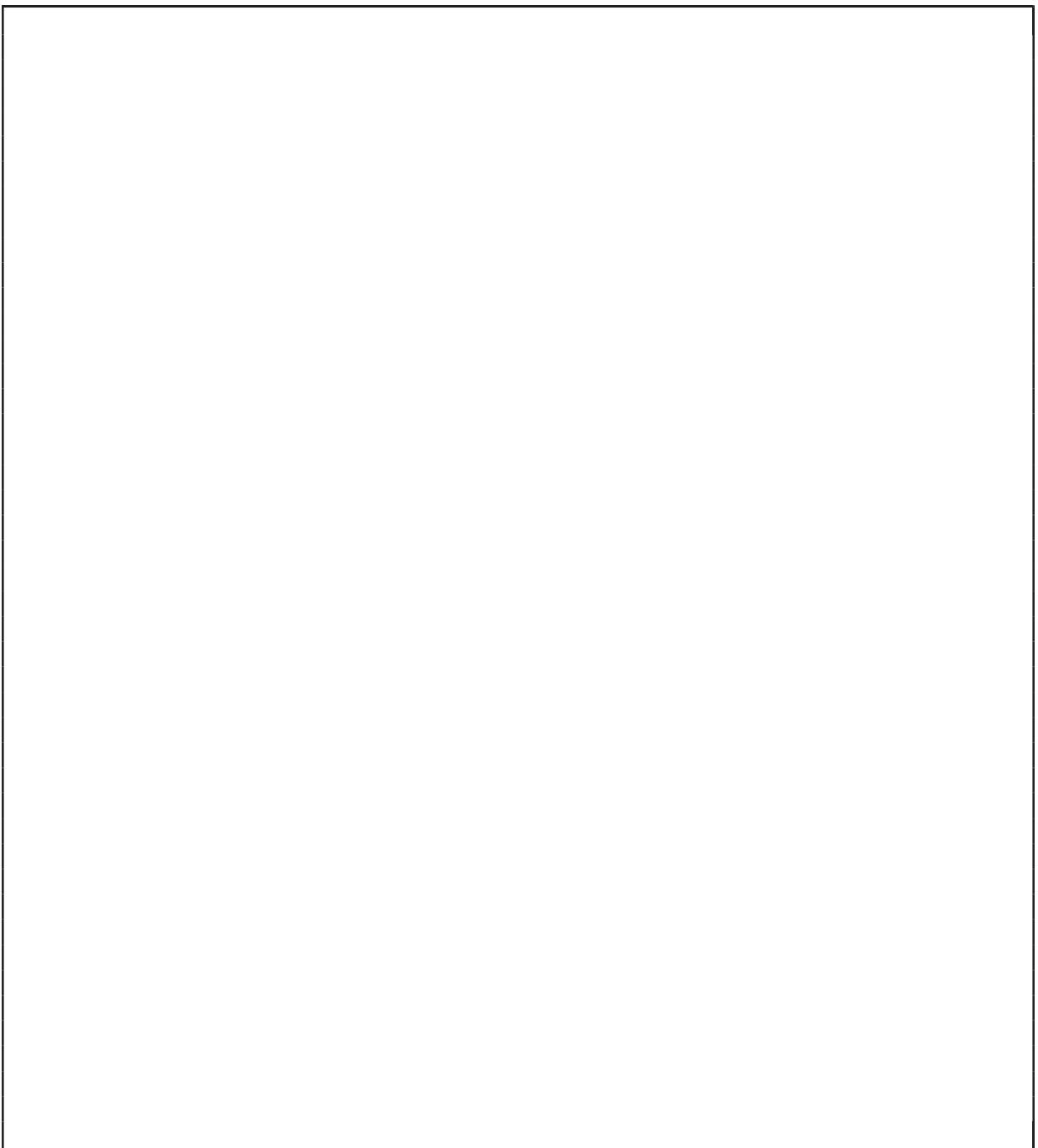
Figure-A IX-5 Histogramme des erreurs de suivi angulaire pour un filtre de suivi de bande passante de 100 kHz

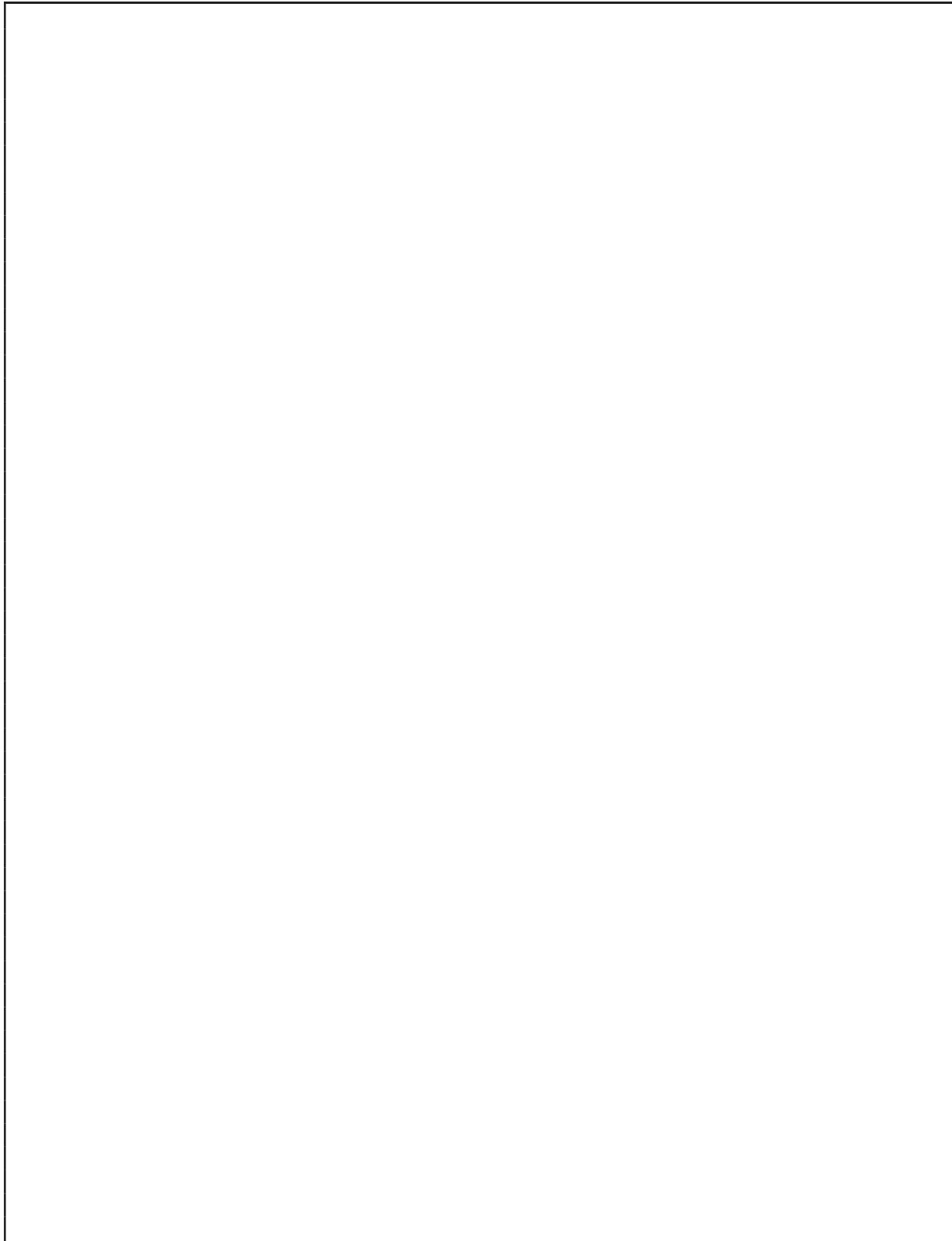


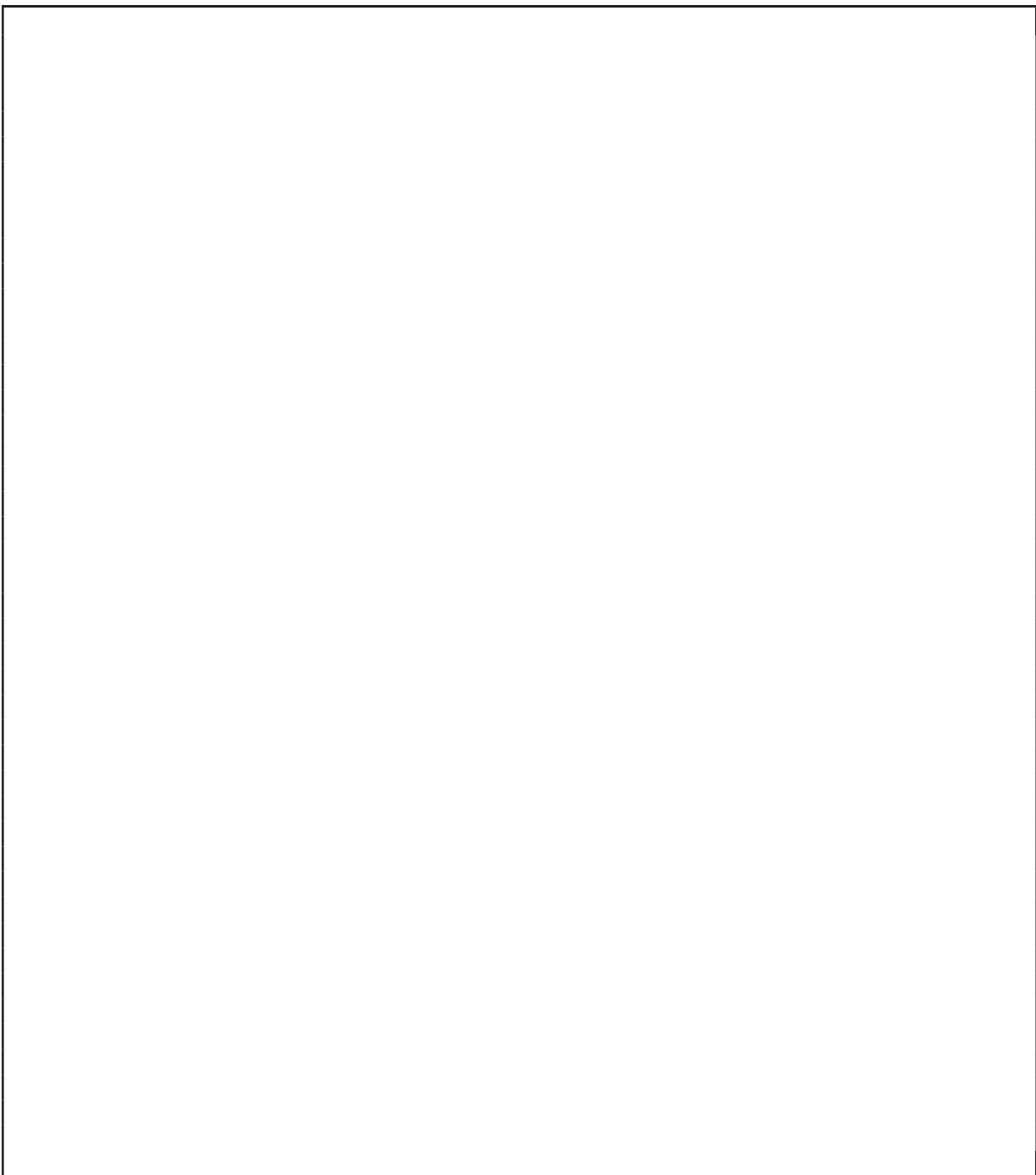
## **ANNEXE X**

### **TRAITEMENT HISTOGRAMME EN 3D DES ANGLES $\theta$ et $\phi$ ET SNR<sub>LMS</sub>**

Algorithme-A X-1 Traitement histogramme en 3D des angles  $\theta$  et  $\phi$  et SNR<sub>LMS</sub>





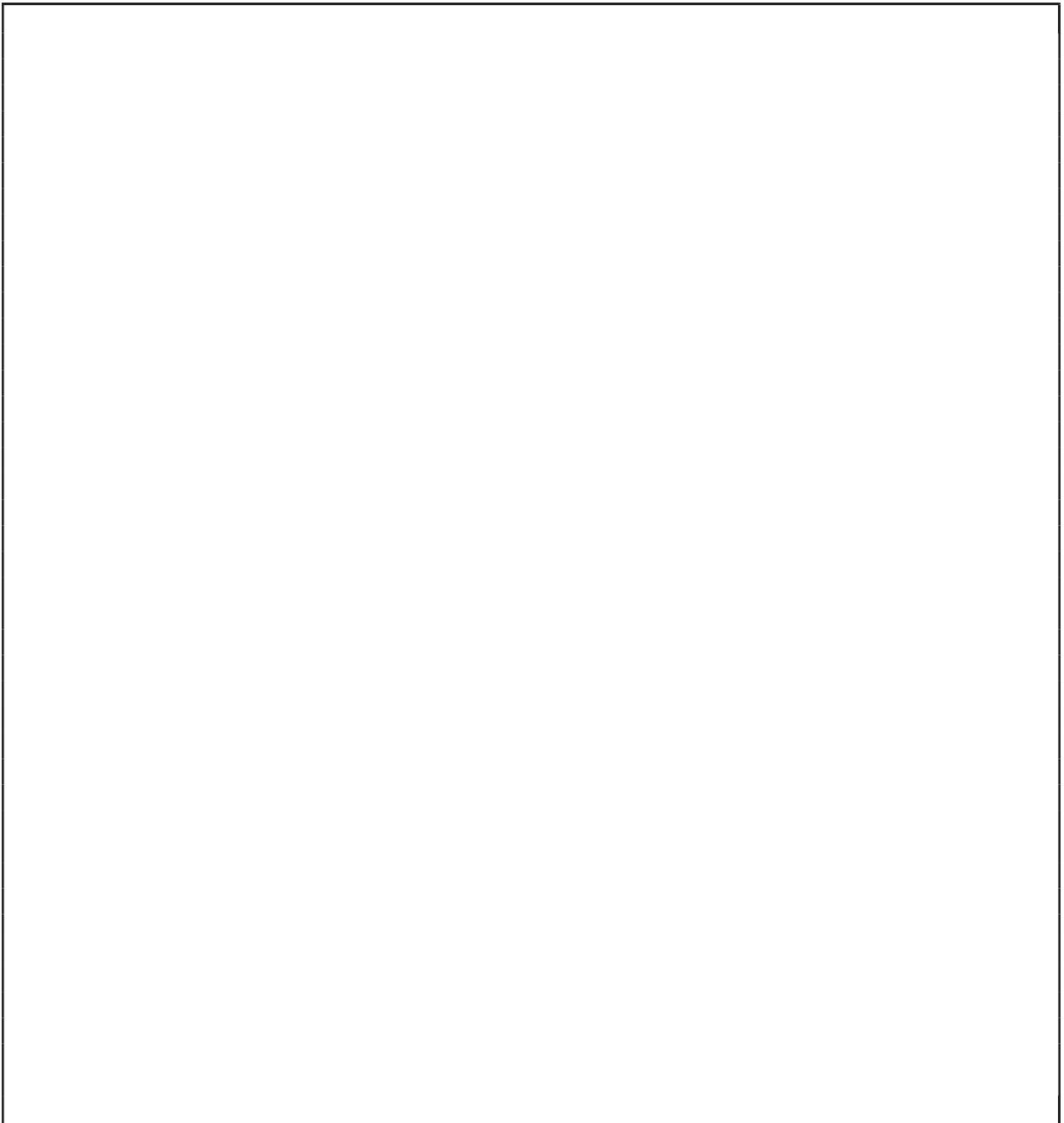


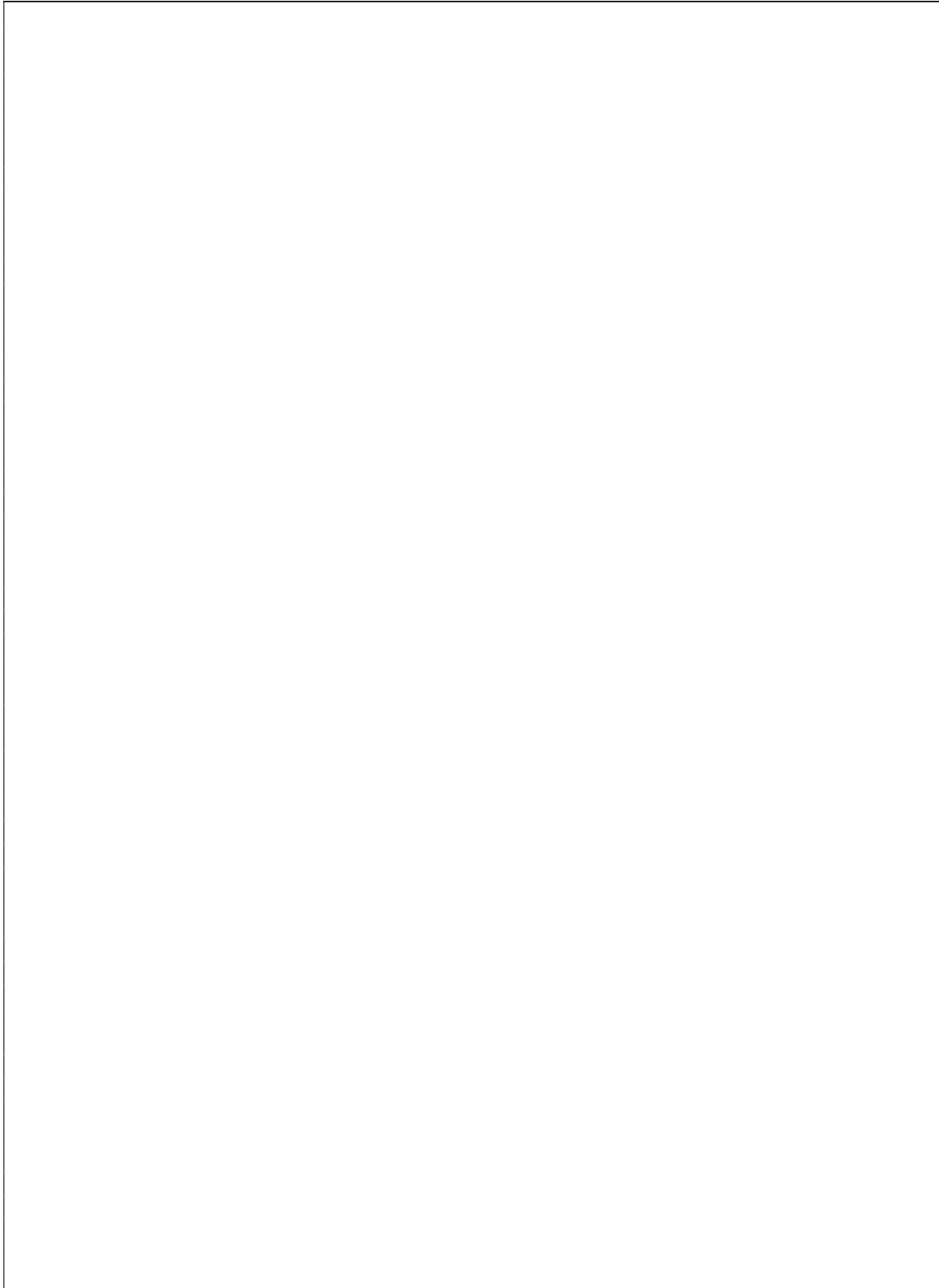


## **ANNEXE XI**

### **FORMATION DE LA MATRICE DE ROTATION R : LA FONCTION ROTATIONALONGARC\_MULTI ET STOKESROTATION**

Algorithme-A XI-1 Fonction RotationAlongArc\_multi

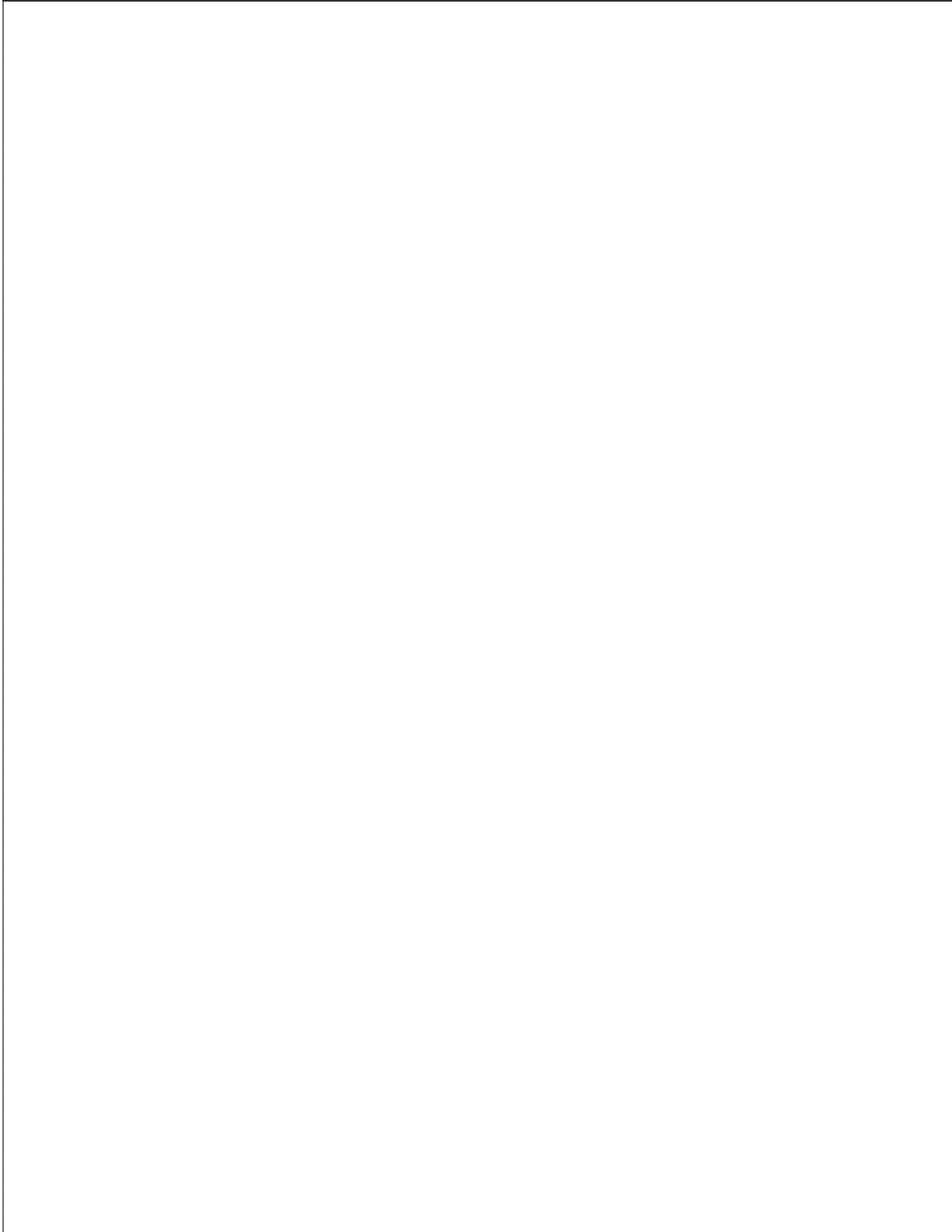


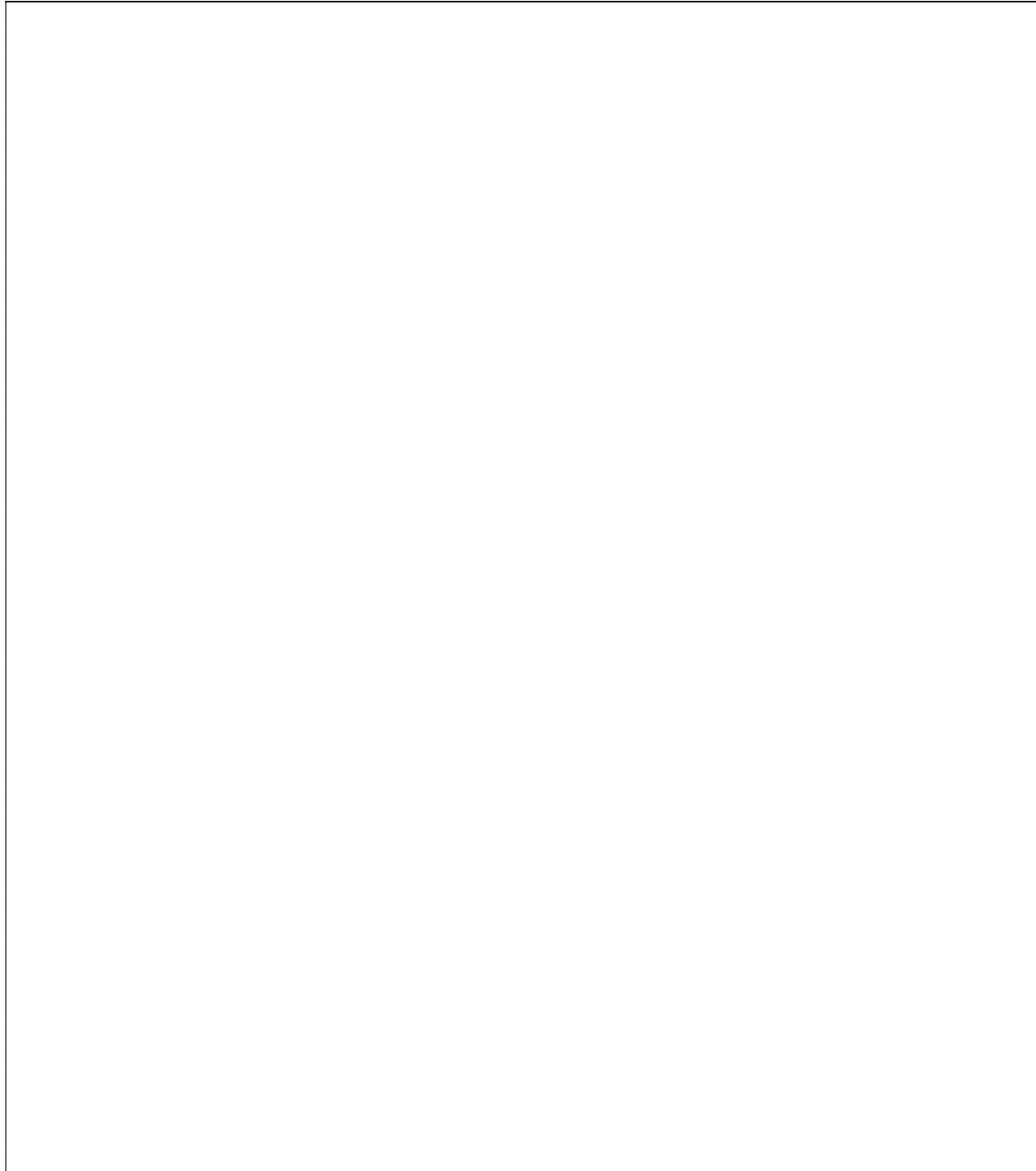






Algorithme-A XI-2 Fonction StokesRotation

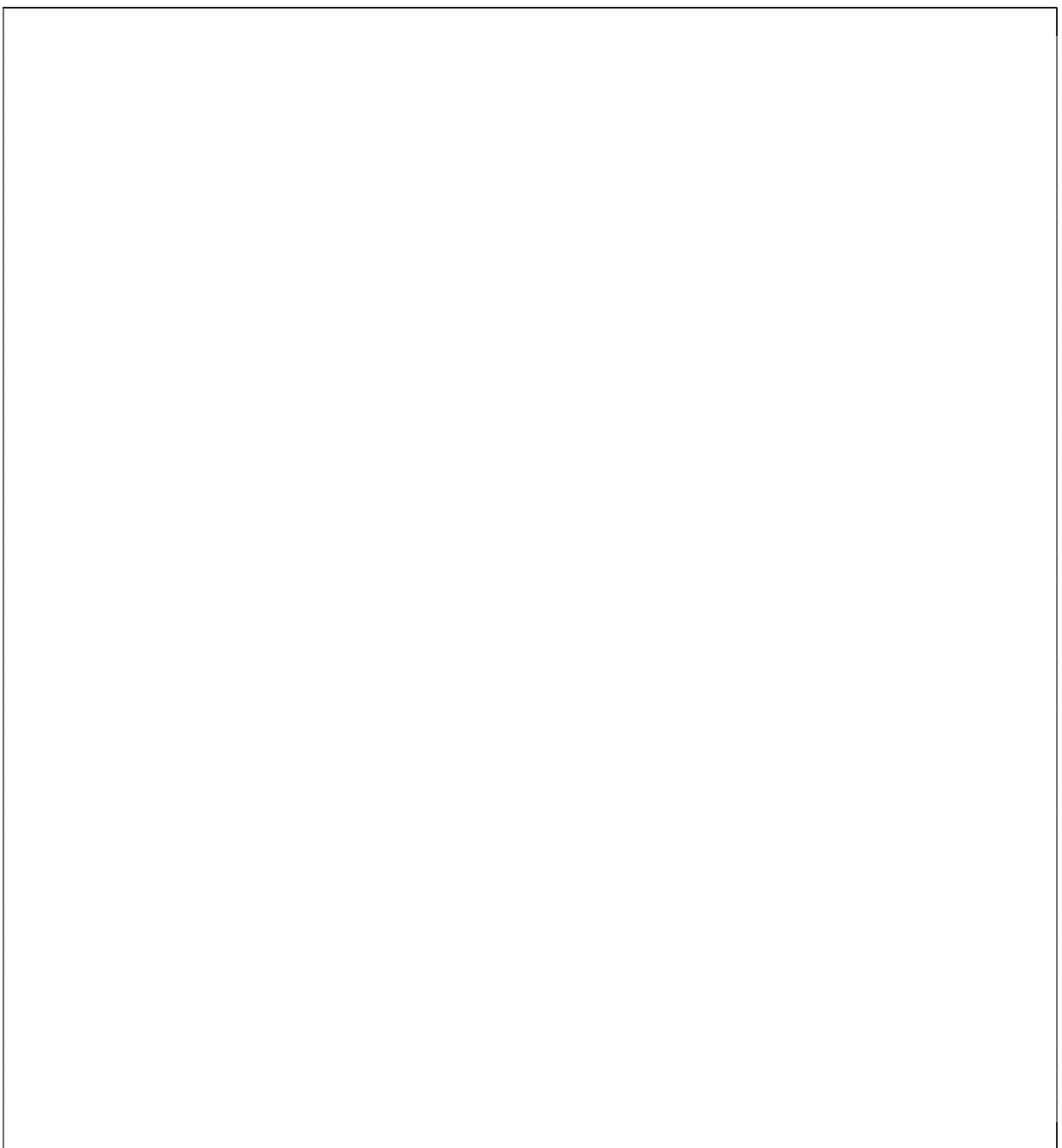


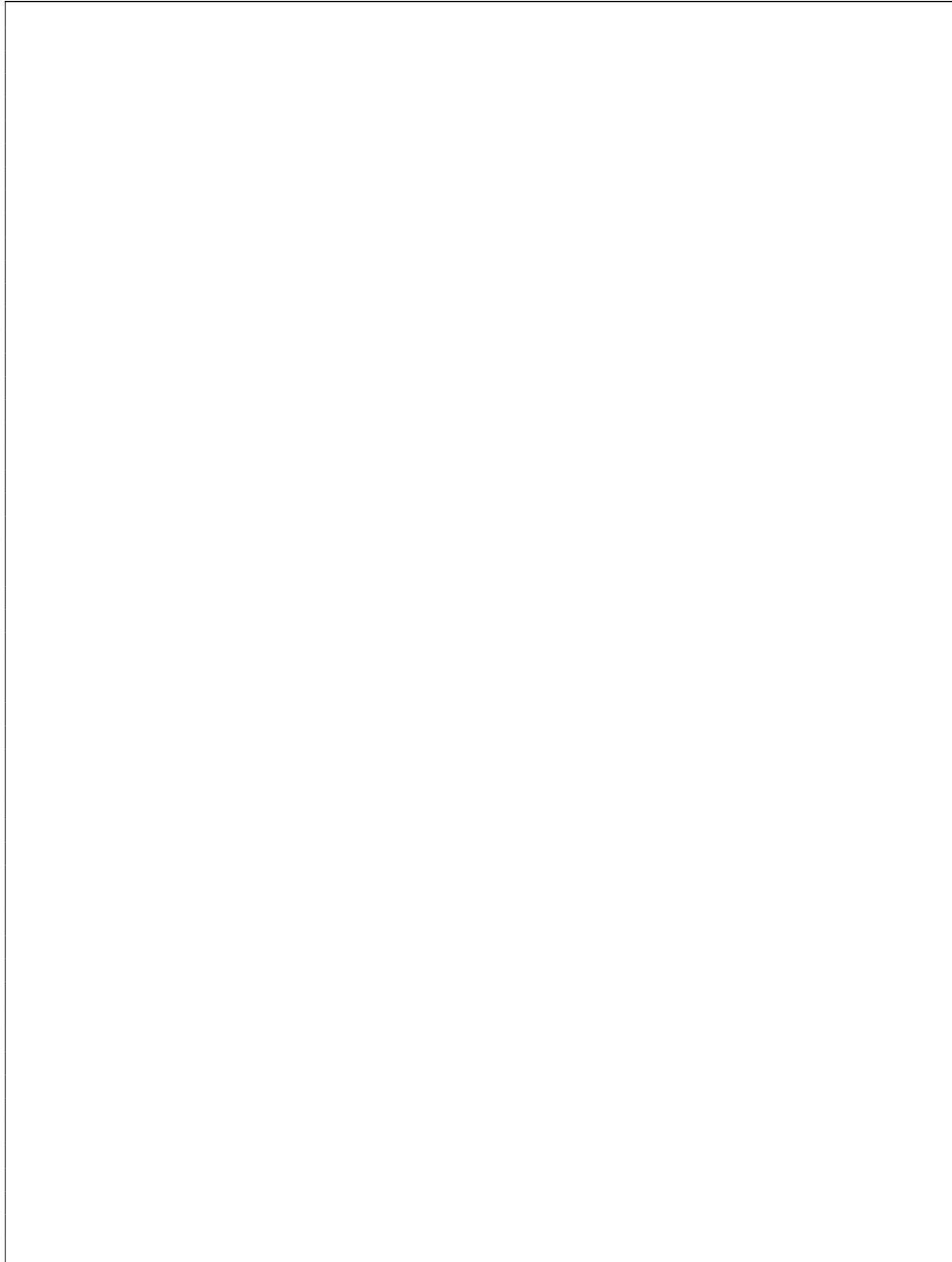


## **ANNEXE XII**

### **TRACÉ DES HISTOGRAMMES 3D DES ANGLES $\theta$ et $\phi$ ET SNR<sub>LMS</sub>**

Algorithme-A XII-1 Tracé des histogrammes 3D des angles  $\theta$  et  $\phi$  et SNR<sub>LMS</sub>









## **ANNEXE XIII**

### **HISTOGRAMMES DES ANGLES $\theta$ et $\phi$**

Dans le mémoire a été présenté le tracé de l'histogramme pour les bandes passantes B égale à 1kHz et 6 kHz. La figure de cette annexe présente le tracé de l'histogramme pour différentes valeurs de B.

B=600 Hz

Figure-A XIII-1 Distribution joint des angles  $\theta$  et  $\phi$  pour un filtre de suivi de bande passante de 600 Hz

B=3 kHz



Figure-A XIII-2 Distribution joint des angles  $\theta$  et  $\phi$  pour un filtre de suivi de bande passante de 3 kHz

B= 10 kHz

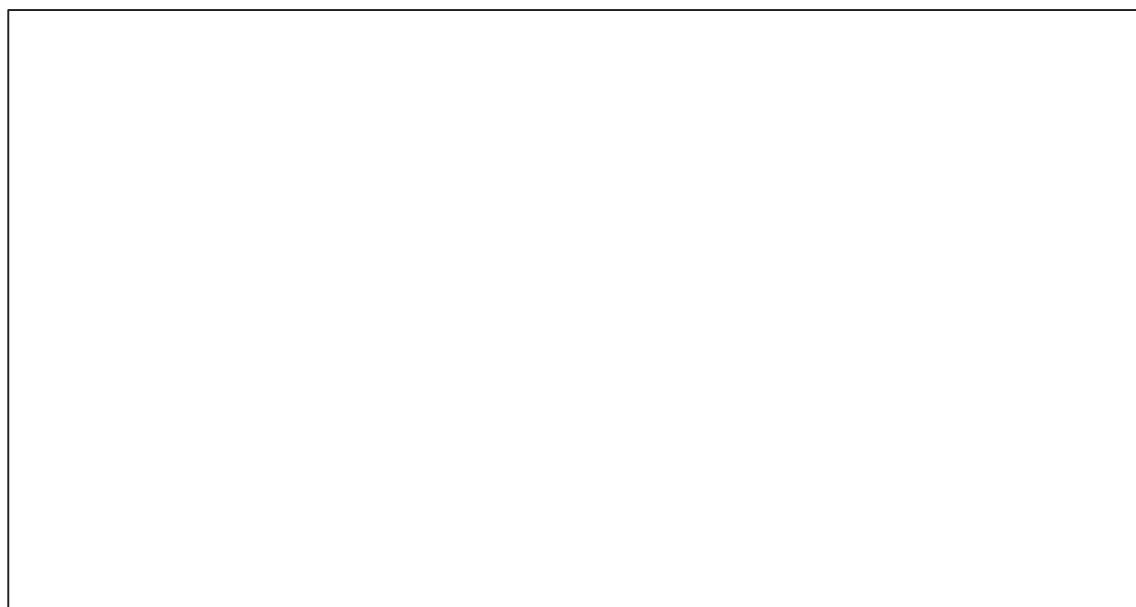


Figure-A XIII-3 Distribution joint des angles  $\theta$  et  $\phi$  pour un filtre de suivi de bande passante de 10 kHz

B= 30 kHz

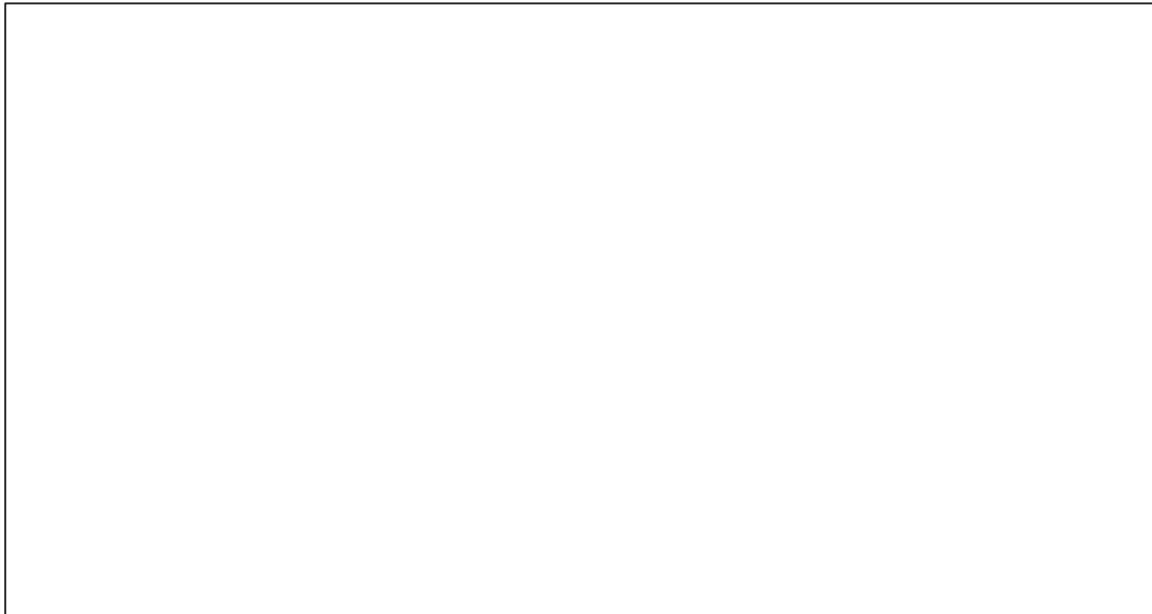


Figure-A XIII-4 Distribution joint des angles  $\theta$  et  $\phi$  pour un filtre de suivi de bande passante de 30 kHz

B= 100 kHz



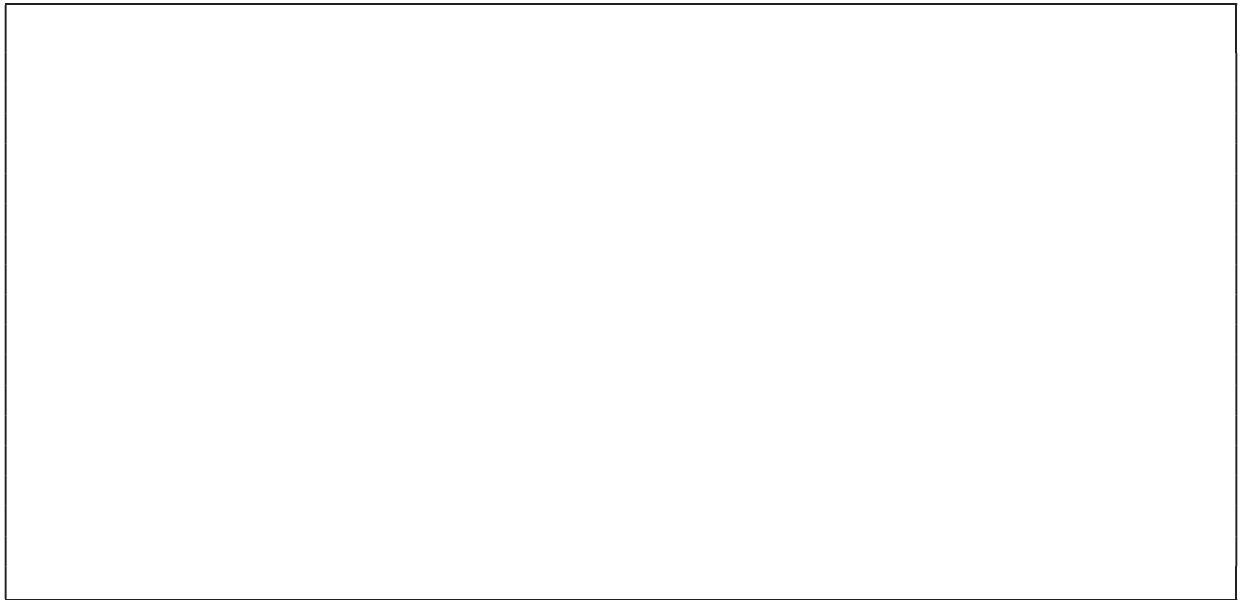
Figure-A XIII-5 Distribution joint des angles  $\theta$  et  $\phi$  pour un filtre de suivi de bande passante de 100 kHz



## **ANNEXE XIV**

### **TRACÉ DE LA TABLE DE CONSULTATION DE SNR<sub>LMS</sub>**

Algorithme-A XIV-1 Tracé de la table de consultation de SNR<sub>LMS</sub>





## **ANNEXE XV**

### **HISTOGRAMMES DES SNR<sub>LMS</sub>( $\theta, \phi$ )**

Dans le mémoire a été présenté le tracé de l'histogramme pour les bandes passantes B égale à 1kHz et 6 kHz. La figure de cette annexe présente le tracé de l'histogramme pour différentes valeurs de B.

B= 600 Hz

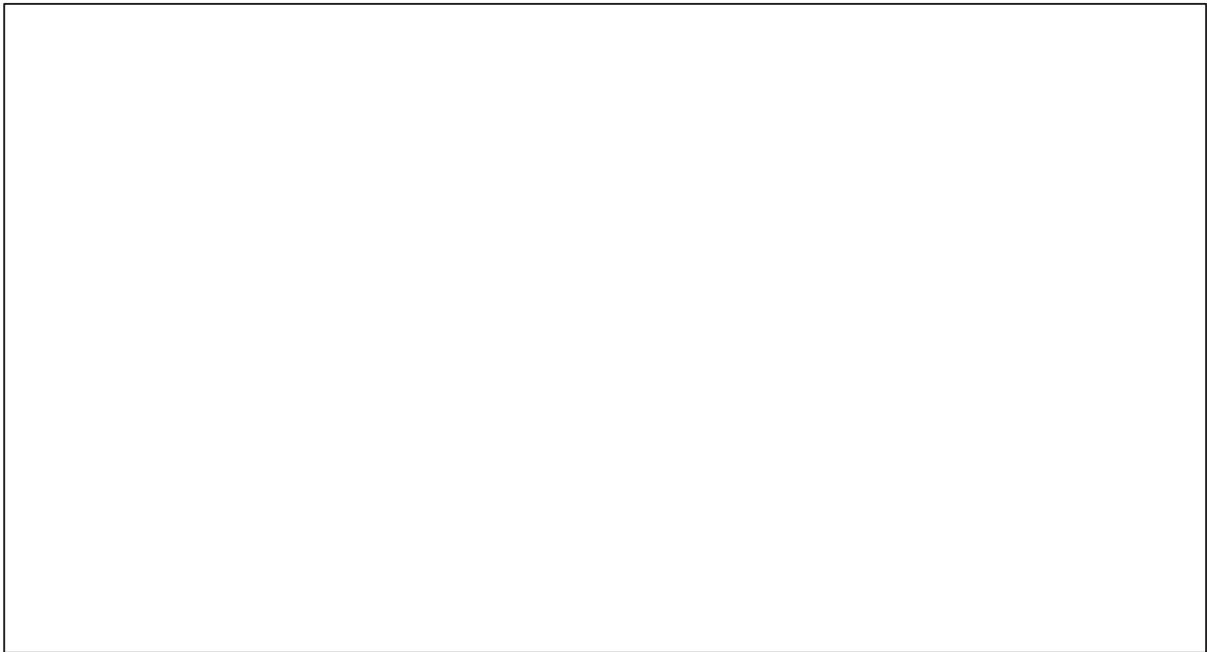


Figure-A XV-1 Histogramme des SNR<sub>LMS</sub>( $\theta, \phi$ ) pour un filtre de suivi de bande passante de 600 Hz

B= 3 kHz

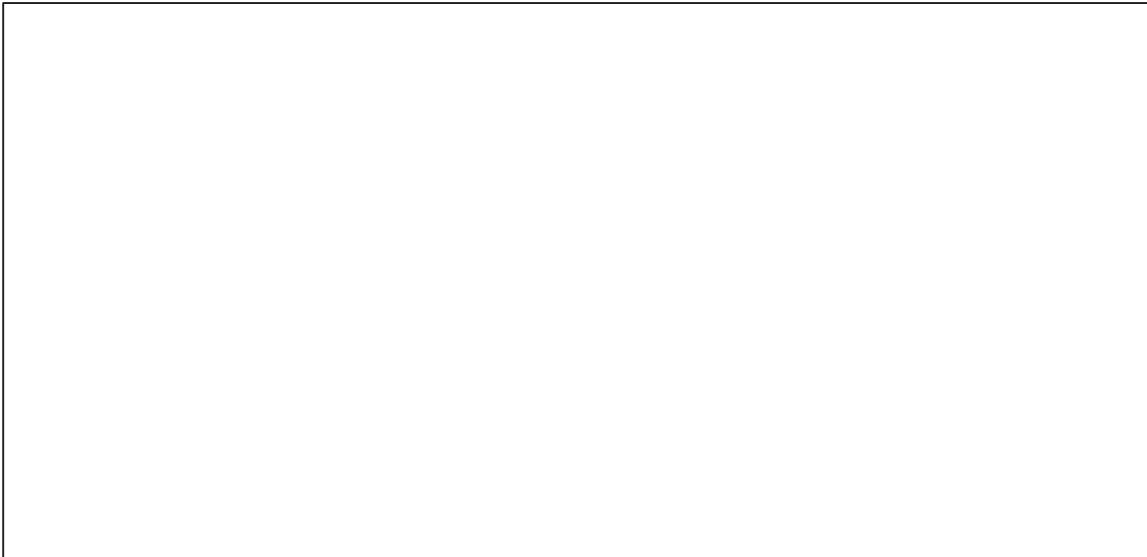


Figure-A XV-2 Histogramme des  $\text{SNR}_{\text{LMS}}(\theta, \phi)$  pour un filtre de suivi de bande passante de 3 kHz

B= 10 kHz

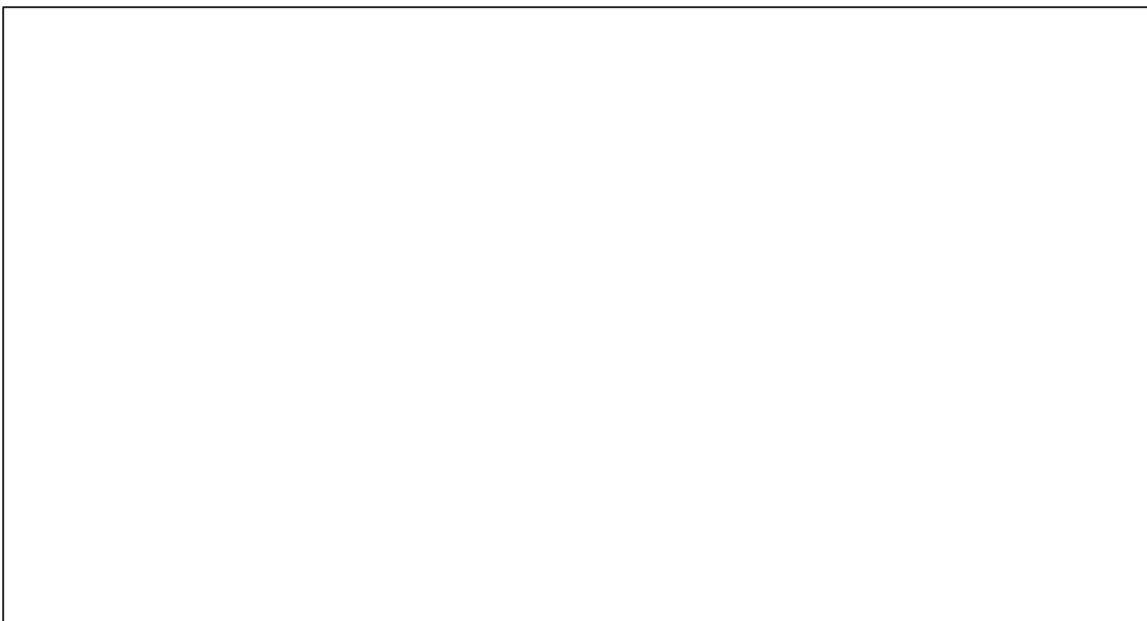


Figure-A XV-3 Histogramme des  $\text{SNR}_{\text{LMS}}(\theta, \phi)$  pour un filtre de suivi de bande passante de 10 kHz

B= 30 kHz

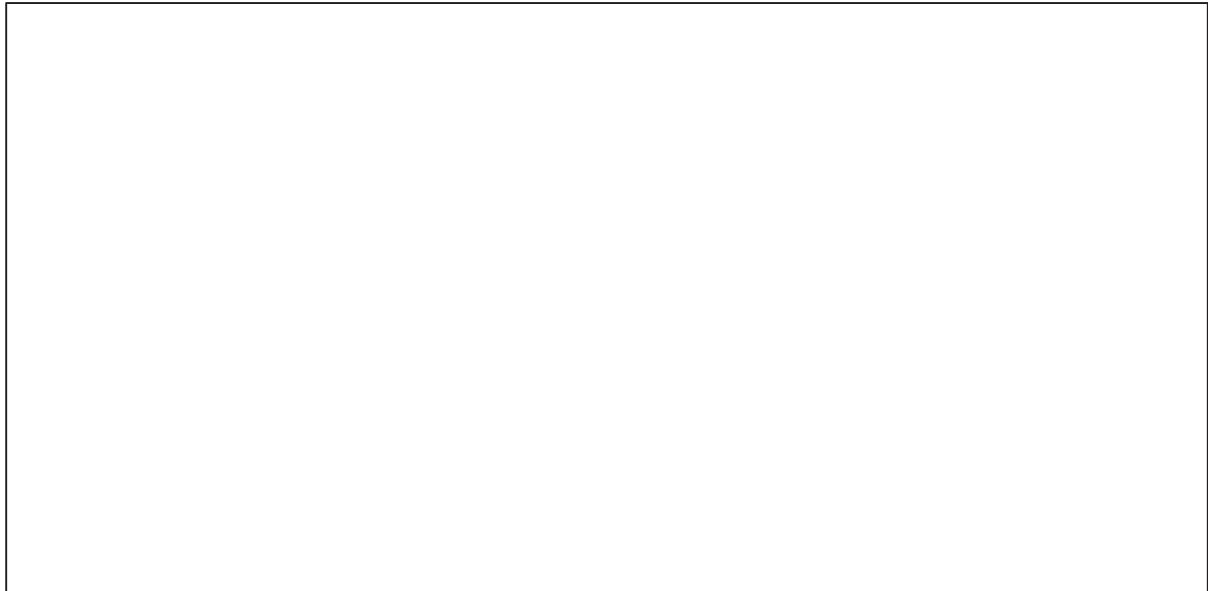


Figure-A XV-4 Histogramme des  $\text{SNR}_{\text{LMS}}(\theta, \phi)$  pour un filtre de suivi de bande passante de 30 kHz

B=100 kHz

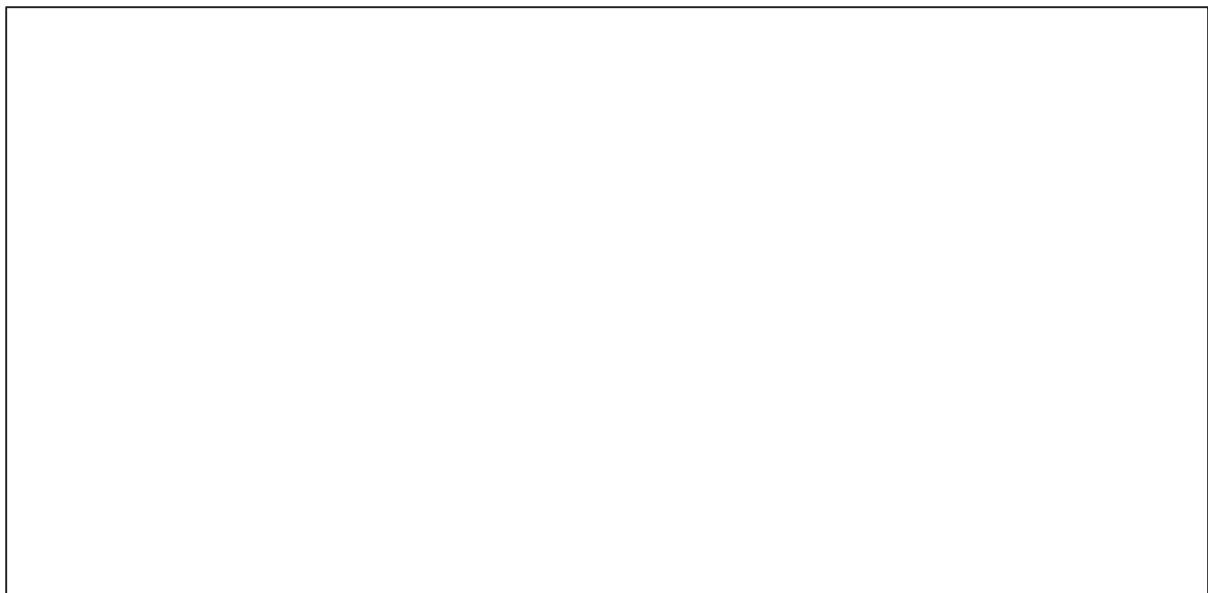


Figure-A XV-5 Histogramme des  $\text{SNR}_{\text{LMS}}(\theta, \phi)$  pour un filtre de suivi de bande passante de 100 kHz



## **ANNEXE XVI**

### **HISTOGRAMMES DES NSR<sub>LMS</sub>**

Dans le mémoire a été présenté le tracé de l'histogramme pour les bandes passantes B égale à 1kHz et 6 kHz. La figure de cette annexe présente le tracé de l'histogramme pour différentes valeurs de B.

B= 600 Hz

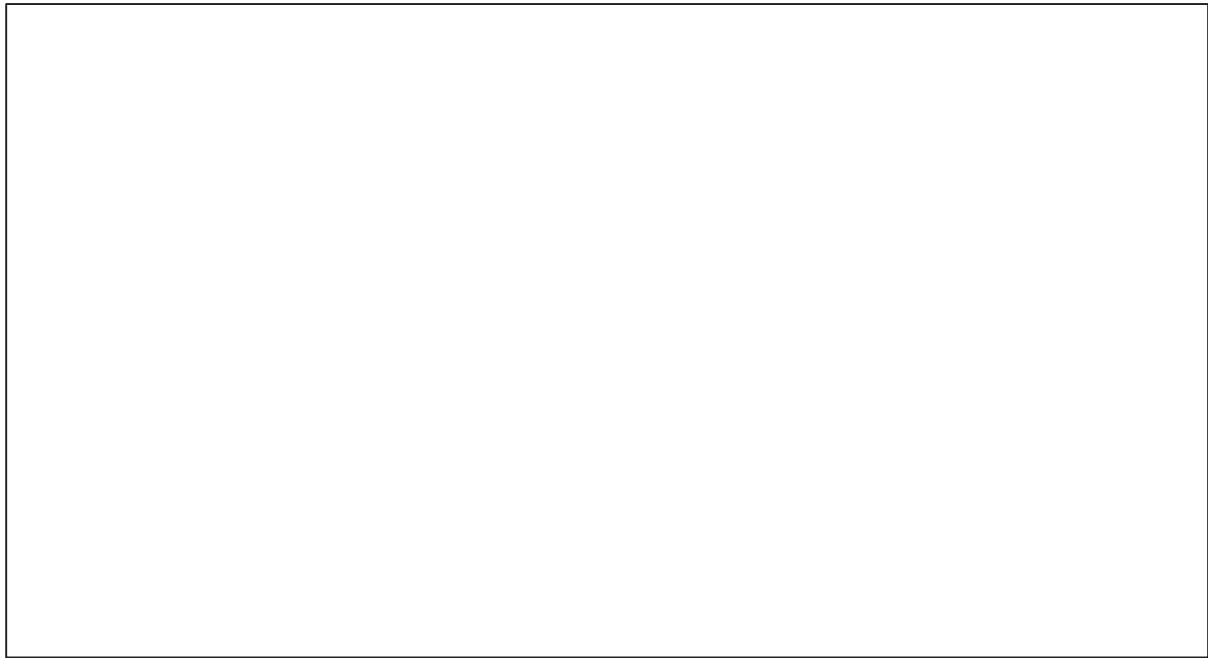


Figure-A XVI-1 Histogramme des  $NSR_{LMS}$  pour un filtre de suivi de bande passante de 600 Hz

B= 3 kHz

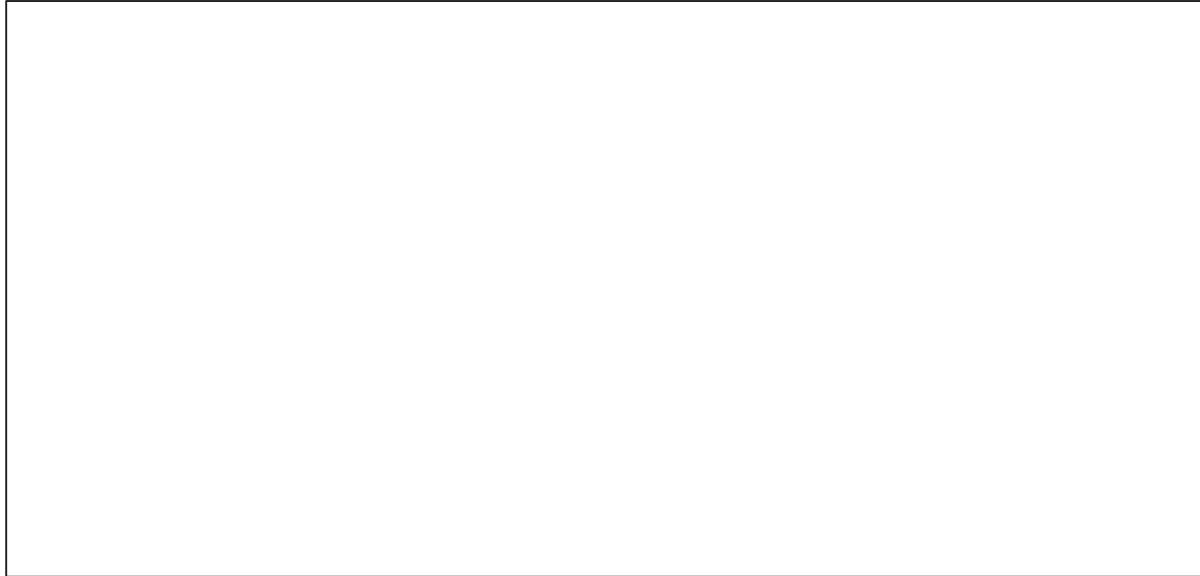


Figure-A XVI-2 Histogramme des  $NSR_{LMS}$  pour un filtre de suivi de bande passante  
de 3 kHz

B= 30 kHz

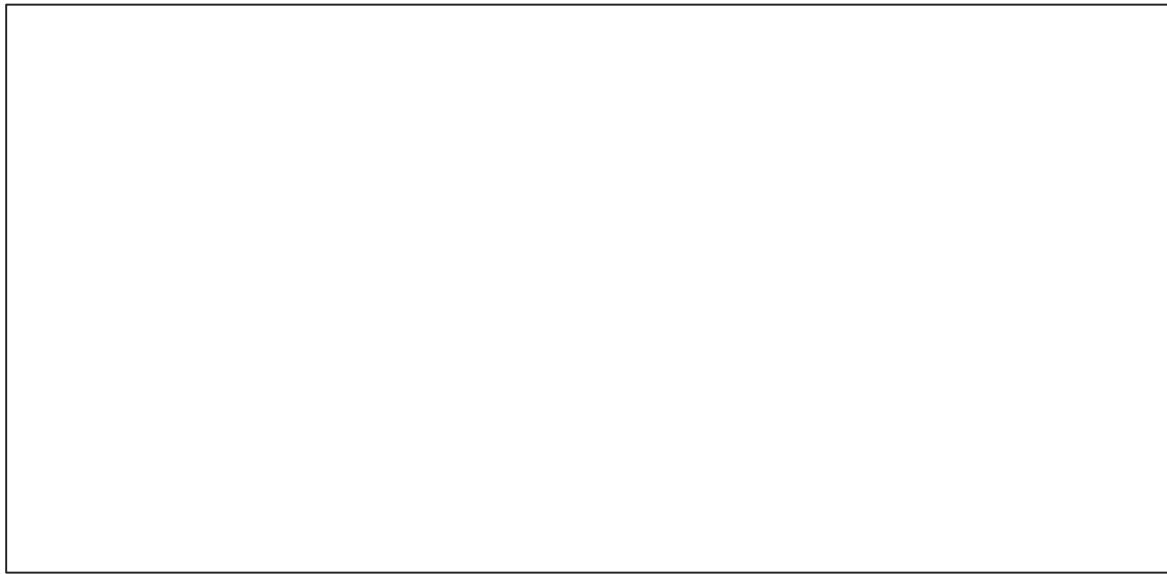
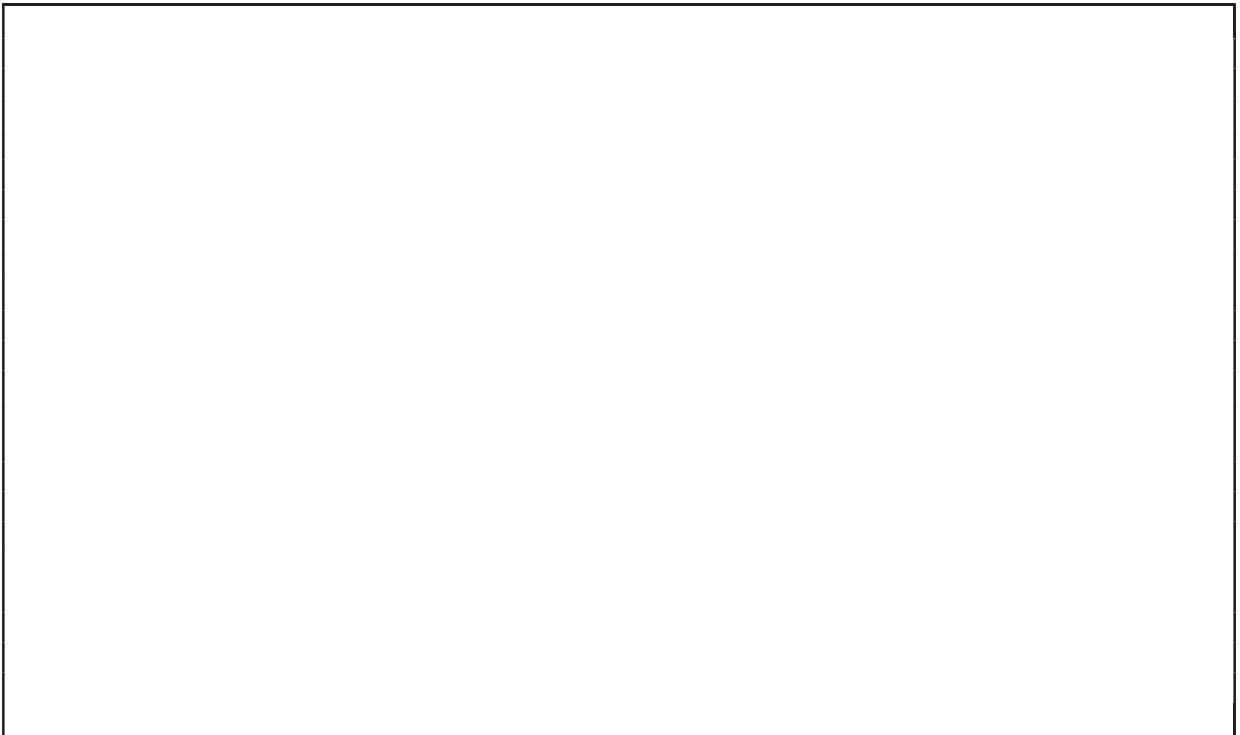


Figure-A XVI-3 Histogramme des  $NSR_{LMS}$  pour un filtre de suivi de bande passante  
de 30 kHz

## **ANNEXE XVII**

### **DISTRIBUTION DE CPD**

Algorithme-A XVII-1 Distribution de CPD

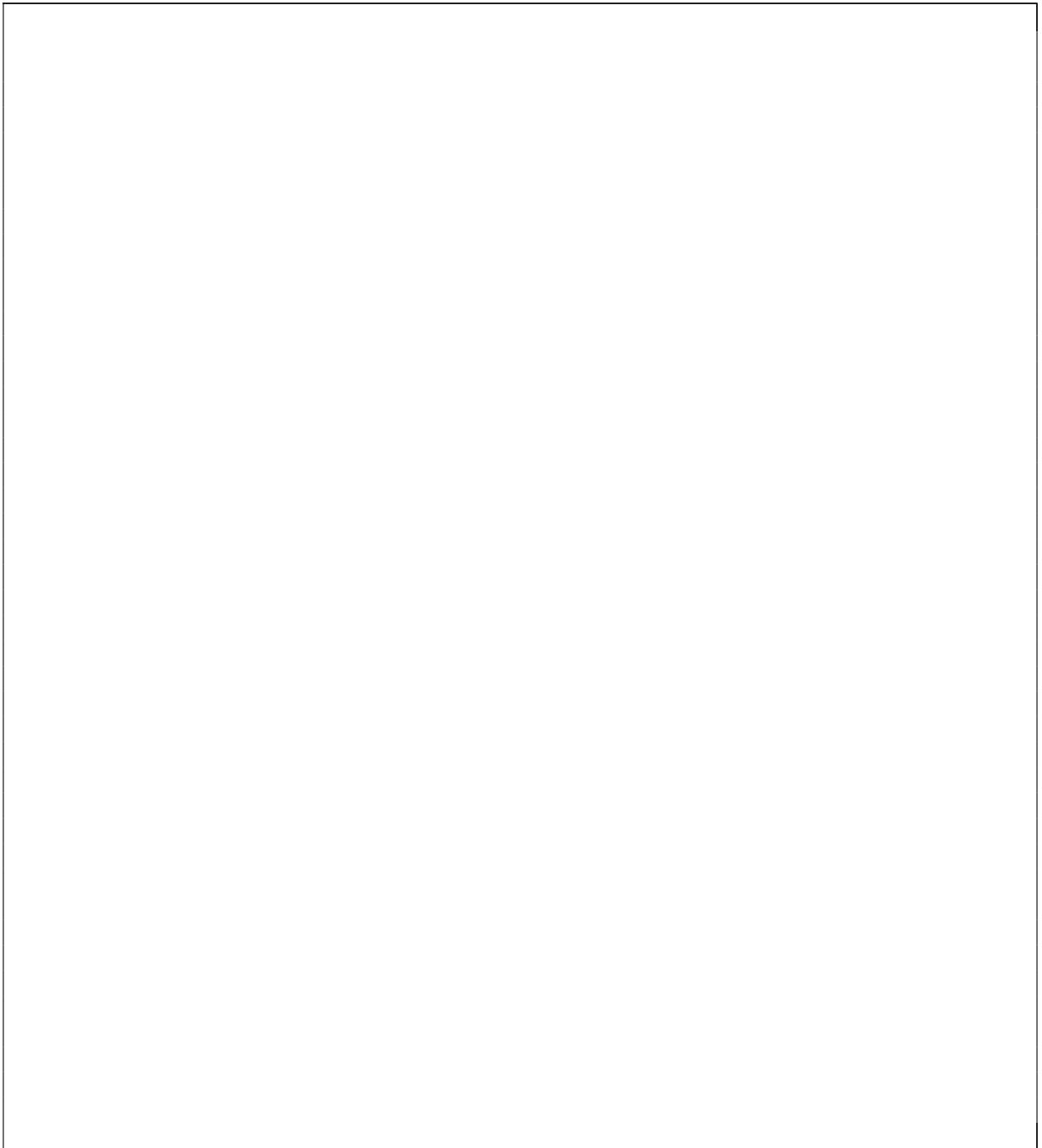




## **ANNEXE XVIII**

### **TRACÉ DU GRAPHE CPD**

Algorithme-A XVIII-1 Tracé du graphe CPD





## BIBLIOGRAPHIE

- A., Supe, et Porins J. 2012. « Interaction Between Electromagnetic Field and Optical Signal Transmission in Fiber Optics ».
- Agilent Technologies. 2002. « Polarization Dependent Loss Measurement of Passive Optical Components». Application note, document PDF, USA. En ligne.12 p.  
<<http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5988-1232EN.pdf>>. Consulté le 9 juin 2016.
- Amelin, Cyril. 2014. « Traitement et analyse de mesures expérimentales d'effets de polarisation dans des liaisons optiques longue distance réalisées avec des modems cohérents à 40 gbit/s ». École de Technologie supérieure, École de Technologie supérieure.
- Bao, Xiaoyi, David S. Waddy et Liang Chen. 2004. « Polarization fluctuations in field fibers. » Dans *The 17th Annual Meeting of the IEEE Lasers and Electro-Optics Society*, 2004. LEOS vol. 1, p. 82-83. IEEE. En ligne.  
<<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=1363121>>.
- Benvenuto, Nevio, et Giovanni Cherubini (1320). 2002. *Algorithms for Communications Systems and their Applications*.
- Boroditsky, M., M. Brodsky, N.J. Frigo, P. Magill et H. Rosenfeldt. 2005. « Polarization Dynamics in Installed Fiberoptic Systems. » Dans *2005 IEEE LEOS Annual Meeting Conference Proceedings*, p. 414-415. IEEE.
- Borowiec, A. 2015. « High Capacity Transport - 100G and Beyond ». In *Photonics North, 2015*. (9-11 June 2015), p. 1-1.
- Brugièr, Thomas. 2015. « Monitoring à long terme d'une liaison optique aérienne cohérente à 40 Gbit/s ». École de technologie supérieure.
- Brugièr, Thomas, Travis Crawford, Aurelien Mortelette, Marie J. Tanoh, Michael Reimer, Maurice O'Sullivan, David Doucet, Christine Tremblay, Daniel L. Peterson, Tiejun J. Xia, Glenn A. Wellbrock et Michel P. Bélanger. 2016. « Polarization Activity Monitoring of an Aerial Fiber Link in a Live Network ». In *OFC*.
- Chan, Calvin C. K. 2010. *Optical Performance Monitoring:Advanced Techniques for Next-Generation Photonic Networks*.

- Chung Y. C. 2008. «Optical performance monitoring techniques; current status and future challenges.» Dans *34th European Conference on Optical Communication*, Brussels, Belgium, pp. 1-3.
- Crawford, Travis H. R., Michael Reimer, Maurice O'Sullivan et Michel Bélanger. 2015. « Correspondance privée ».
- El-Darawy, M., T. Pfau, S. Hoffmann, R. Peveling, C. Wordehoff, B. Koch, M. Porrmann, O. Adamczyk et R. Noe. 2008. « Fast Adaptive Polarization and PDL Tracking in a Real-Time FPGA-Based Coherent PolDM-QPSK Receiver ». *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 20, n° 21, p. 1796-1798.
- Hauske, F. N., J. C. Geyer, M. Kuschnerov, K. Piyawanno, T. Duthel, C. R. S. Fludger, D. van den Borne, E. D. Schmidt, B. Spinnler, H. de Waardt et B. Lankl. 2008. « Optical Performance Monitoring from FIR Filter Coefficients in Coherent Receivers ». In *Optical Fiber communication/National Fiber Optic Engineers Conference, 2008. OFC/NFOEC 2008. Conference on.* (24-28 Feb. 2008), p. 1-3.
- Hui, Rongqing, et Maurice O'Sullivan. 2009. *Fiber Optic Measurement Techniques*.
- Keiser, Gerd. 2011. « Optical fiber communications. » New York : McGraw-Hill.
- Kurono, Masahiro, et Masayuki Isawa. 1999. « Field Measurements and a study of transient State of Polarization Produced in OPGW by Lightning ». *Electrical Engineering in Japan*, vol. Vol.128, No 4, p. 10.
- Kuschnerov, Dr. Maxim, et Dr. Maximilian Herrmann. 2016. « Lightning Affects Coherent Optical Transmission in Aerial Fiber ». *Lightwave*.
- Matsuda, T., T. Kawasaki, T. Kotanigawa, A. Naka et K. Oda. 2009. « Field trial of 43-Gbit/s RZ-DQPSK transmission in aerial fiber with rapidly changing SOP. »
- M. Paolone, E. Petrache, F.Rachidi, C.A.Nucci, V. A. Rakov, M.A.Uman, K. Rambo D. Jordan, J. Jerauld, et and J. Schoene M. Nyffeler. 2005. « Lightning Induced Disturbances in Buried Cables—Part II: Experiment and Model Validation ». *IEEE transactions on electromagnetic compatibility*, vol. VOL. 47, NO. 3, p. 12.
- Makki, A. H. I., A. K. Dey et M. A. Khan. 2010. « Comparative study on LMS and CMA channel equalization ». In *Information Society (i-Society), 2010 International Conference on.* (28-30 June 2010), p. 487-489.
- Michel, Annie. 2016. « Monitoring of performance parameters in a metro ring using a 100G coherent transponder ». École de technologie supérieure.
- Misha Boroditsky, Misha Brodsky, Nicholas J. Frigo, Peter Magill, Harald Rosenfeldt. 2005.

- « Polarization Dynamics in Installed Fiberoptic Systems. ».
- Mortelette, Aurélien. 2014. « Monitoring et caractérisation des effets de polarisation de deux liaisons optiques cohérentes ». École de technologie supérieur.
- Nelson, Lynn E., Martin Birk, Sheryl L. Woodward et Peter Magill. 2011. « Field measurements of polarization transients on a long-haul terrestrial link. » Dans *IEEE Photonic Society 24th Annual Meeting*, p. 833-834. IEEE.
- New Ridge Technologies.2016. En ligne .<<http://newridgetech.com/What-is-second-order-PMD-Is-SOPMD-important.html>>. Consulté le 15 Mai 2016.
- New Ridge Technologies.2016. En ligne.<<http://newridgetech.com/blog/are-ultrafast-sop-events-affecting-your-receivers/>>. Consulté le 16 Mars 2016.
- Peterson, Daniel L. 2004. « Estimation of outage statistics due to polarization mode dispersion ». University of Texas at Dallas.
- Peterson, Daniel, Bryan Ward, Kent Rochford, Paul Leo et Greg Simer. 2002. « Polarization mode dispersion compensator field trial and field fiber characterization. » Dans *Optics Express*, vol. 10, no 14, p. 614. En ligne. <<http://www.opticsinfobase.org/viewmedia.cfm?uri=oe-10-14-614&seq=0&html=true>>. Consulté le 22 décembre 2015.
- Peterson, D.L., P.J. Leo et K.B. Rochford. 2004. « Field measurements of state of polarization and PMD from a tier-1 carrier ». Dans *Optical Fiber Communication Conference 2004 (OFC 2004)*. (Los Angeles, CA, Feb. 23-27 2004), vol.2. p. 1-4. Los Angeles (CA): IEEE.
- Pfau, T., S. Hoffmann, O. Adamczyk, R. Peveling, V. Herath, M. Porrmann et R. Noé. 2008. « Coherent optical communication: Towards realtime systems at 40 Gbit/s and beyond ». *Optics Express*, vol. 16, n° 2, p. 866-872.
- Pietralunga, Silvia M., Julien Colombelli, Andrea Fellegara et Mario Martinelli. 2004. « Fast Polarization Effects in Optical Aerial Cables Caused by Lightning and Impulse Current ». *IEEE photonics technology letters*, vol. VOL. 16, NO. 11.
- Pietralunga;, S. M., P. Boffi;, J. Colombelli;, L. Marazzi;, J. Osmond;, A. Melloni M. Martinelli, A. Fellegara et G. Vegetti. 2004. « Effects of lightning and short-circuit discharges on WDM overhead transmission at 10 Gb/s ». In *OSA/CLEO*. (2004), p. 3.
- Proakis, J. G. 1989. *Digital Communications*, 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 1989., 2nd ed.
- Proakis, John G., et Dimitris G. Manolakis. 1996. *Digital Signal Processing Principles, Algorithms, and Applications*. Prentice-Hall Canada, Inc., Toronto.

- Roberts, K., S. H. Foo, M. Moyer, M. Hubbard, A. Sinclair, J. Gaudette et C. Laperle. 2015. « High Capacity Transport&#x2014;100G and Beyond ». *Journal of Lightwave Technology*, vol. 33, n° 3, p. 563-578.
- Roberts, K., M. O' Sullivan, K. T. Wu, H. Sun, A. Awadalla, D. J. Krause et C. Laperle. 2009. « Performance of Dual-Polarization QPSK for Optical Transport Systems ». *Journal of Lightwave Technology*, vol. 27, n° 16, p. 3546-3559.
- S.Waddy, David, Ping Lu, Liang Chen et Xiaoyi Bao. 2001. « Fast State of Polarization Changes in Aerial Fiber Under Different Climatic Conditions ». *IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS*, vol. VOL. 13, NO. 9.
- Savory, S. J., G. Gavioli, R. I. Killey et P. Bayvel. 2007. « Transmission of 42.8Gbit/s Polarization Multiplexed NRZ-QPSK over 6400km of Standard Fiber with no Optical Dispersion Compensation ». In *Optical Fiber Communication and the National Fiber Optic Engineers Conference, 2007. OFC/NFOEC 2007. Conference on.* (25-29 March 2007), p. 1-3.
- Sokolov, Stanislav Alexandrovich. 2009. « Influens of lightning strokes on optical fiber cable without metal in its design ». In. (SEPTEMBER 2009).
- Sokolov S. A.. 2007. «Particularities of Polarization-Mode Dispersion in optical fiber with Wavelength Division Multiplexing during the Lightning stroke.» *Dans International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Qingdao, pp. 448-450.
- Szafraniec, B., T. S. Marshall et B. Nebendahl. 2013. « Performance Monitoring and Measurement Techniques for Coherent Optical Systems ». *Journal of Lightwave Technology*, vol. 31, n° 4, p. 648-663.
- Technologies, Agilent. 2008. « Agilent N7781B Polarization Analyzer ». <<http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5989-8109EN.pdf>>.
- Technologies, New Ridge. 2016. « are ultrafast sop events affecting your coherent receivers? ». In *New Ridge Technologies.* (16 Fevrier 2016) Vol. 2016. Coll. « New Ridge Technologies ».
- Waddy, David S., Liang Chen et Xiaoyi Bao. 2005. « Fast PMD and PDL Measurement of Aerial Fiber ».
- Woodward, S. L., L. E. Nelson, M. D. Feuer, X. Zhou, P. D. Magill, S. Foo, D. Hanson, H. Sun, M. Moyer et M. O' Sullivan. 2008. « Characterization of Real-Time PMD and Chromatic Dispersion Monitoring in a High-PMD 46-Gb/s Transmission System ».

*IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 20, n° 24, p. 2048-2050.

Woodward, S. L., L. E. Nelson, C. R. Schneider, L. A. Knox, M. O' Sullivan, C. Laperle, M. Moyer et S. Foo. 2012. « Field observations of optical parameters using integrated performance monitoring ». In *Optical Fiber Communication Conference and Exposition (OFC/NFOEC), 2012 and the National Fiber Optic Engineers Conference*. (4-8 March 2012), p. 1-3.

Woodward, S. L., L. E. Nelson, C. R. Schneider, L. A. Knox, M. O' Sullivan, C. Laperle, M. Moyer et S. Foo. 2014. « Long-Term Observation of PMD and SOP on Installed Fiber Routes ». *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 26, n° 3, p. 213-216.