

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

COMME EXIGENCE PARTIELLE
À L'OBTENTION DE LA
MAITRISE EN GÉNIE ÉLECTRIQUE
M. ING.

PAR
Andrew Michael CASSIDY

PERFORMANCE DYNAMIQUE DE RÉSEAUX OPTIQUES SANS FILTRE:
RESSOURCES RÉSEAU ET QUALITÉ DE TRANSMISSION

MONTRÉAL, LE 27 SEPTEMBRE 2012

©Tous droits réservés, Andrew Michael Cassidy, 2012

©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 :

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

Professeur Sylvain G. Cloutier, membre du jury
Département de génie électrique à l'École de technologie supérieure

Professeur Zbigniew Dziong, président du jury
Département de génie électrique à l'École de technologie supérieure

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

LE 29 AOUT 2012

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier ma directrice, Christine Tremblay, pour m'avoir offert la possibilité de travailler sur le projet sans filtre et pour m'avoir encadré pendant la durée de ma maîtrise.

Je remercie aussi Guillaume Mantelet et Nicolas Egmont, mes collègues de l'équipe sans filtre, pour l'aide et le soutien ainsi que de conseils m'étant permis de compléter cette maîtrise avec succès.

Aussi, je remercie Daniel O'Brien pour le développement des algorithmes génétiques de conception de réseaux sans filtre ainsi qu'Émile Archambault pour le développement d'algorithmes d'assignation du minimum de longueurs d'onde dans un contexte statique.

Enfin, j'aimerais remercier Michel Bélanger et Paul Littlewood, collaborateurs au projet des réseaux optiques sans filtre chez Ciena, pour leur implication dans l'élaboration de mes travaux de recherche.

PERFORMANCE DYNAMIQUE DE RESEAUX OPTIQUES SANS FILTRE: RESSOURCES RÉSEAU ET QUALITÉ DE TRANSMISSION

Andrew Michael CASSIDY

RÉSUMÉ

Les réseaux optiques sans filtre sont caractérisés par une architecture économique qui permet la reconfiguration dynamique du réseau en fonction de la demande de trafic. Dans cette architecture, la fonction de commutation est réalisée par des transmetteurs accordables et de récepteurs cohérents aux nœuds d'entrée et sortie et les dispositifs de commutation de longueurs d'onde sont remplacés par des composants optiques passifs aux nœuds intermédiaires. Les récepteurs cohérents et transmetteurs accordables sont équipés de modules de traitement numérique de signal (DSP) qui ont l'avantage de pouvoir compenser la dispersion chromatique (CD), la dispersion modale de polarisation (PMD) et la perte dépendante en polarisation (PDL) ce qui augmente ainsi la portée du système.

Un nouveau simulateur de plan de contrôle a été développé. Il permet de modéliser de manière dynamique le contrôle et la gestion du trafic tout en tenant compte des limitations de la couche physique du réseau, comme le bruit, la dégradation du rapport signal sur bruit optique, les latences de propagation. Le simulateur de plan de contrôle, développé en langage C++ à partir de la plateforme de simulation à événements discrets OMNeT++, permet d'étudier le comportement dynamique spécifique à l'architecture de réseau sans filtre. Des simulations ont été réalisées en utilisant des modèles de composantes de nouvelle génération comprenant des transmetteurs-récepteurs optiques accordables DQPSK à 46 Gb/s. Dans ce mémoire, nous démontrons la fonctionnalité du simulateur et les résultats obtenus avec le simulateur, pour différentes topologies de réseau sans filtre et différentes matrices de trafic, qui montrent comment elles ont un impact sur la qualité de la transmission et l'assignation de longueur d'onde peut être gérée par le plan de contrôle.

Mots-clés : réseau optique sans filtre, récepteur-transmetteur sans couleur accordable, simulation, dynamique, couche physique, coupleur optique, GMPLS, plan de contrôle, DWDM

PERFORMANCE DYNAMIQUE DE RESEAUX OPTIQUES SANS FILTRE: RESSOURCES RÉSEAU ET QUALITÉ DE TRANSMISSION

Andrew Michael Cassidy

ABSTRACT

Filterless networks are characterized by an agile cost effective architecture that allows dynamic reconfiguration of the network according to the traffic demand. In this architecture, the switching effort is shifted at egress and ingress nodes by the use of tuneable transceivers and coherent receivers and by the replacement of wavelength selective switching devices by passive optical components at intermediate nodes. Coherent receivers and tuneable transmitters equipped with digital signal processing (DSP) modules have the advantages of being able to compensate for chromatic dispersion (CD), polarization mode dispersion (PMD) and polarization dependent loss (PDL) thus increasing the system's reach.

The new simulator is able to take into account both the propagation of the physical layer impairments (such as noise funnelling, optical signal to noise ratio degradation, propagation delays) as well as the dynamical behaviour of the control plane for and efficient traffic management, which is aware of these impairments. A custom C++ simulator based on the discrete event simulator OMNeT++ has been developed to study this behaviour in order to facilitate the development of physical layer impairments aware control plane adapted to the filterless architecture. Simulations have been performed using models from current generation, state of the art, tuneable 46 Gb/s DQPSK optical transceivers. In this thesis, we show the internal working of the simulator and results of how different network topologies and varying traffic demands, dynamically impact the quality of transmission as well as the wavelength assignment managed by the control plane.

Keywords: filterless optical network, colorless transceivers, physical layer, optical coupler, GMPLS, control plane, simulator, DWDM

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 RÉSEAUX OPTIQUES SANS FILTRE.....	3
1.1 Multiplexage par répartition en longueur d'onde (WDM).....	3
1.2 Les limitations imposées par la fibre optique.....	3
1.2.1 Les pertes dans la fibre optique.....	4
1.2.1.1 Atténuation	5
1.2.1.2 La dispersion dans la fibre optique.....	6
1.2.1.3 La dispersion des modes de polarisation	7
1.2.2 Les effets non linéaires.....	8
1.2.2.1 Impact du mélange à quatre ondes sur les réseaux sans filtre	10
1.3 Les composantes d'un réseau optique WDM.....	11
1.3.1 Module d'émission optique : le transmetteur	11
1.3.1.1 Format de modulation.....	12
1.3.2 Récepteur optique et sensibilité	13
1.3.3 Amplificateur optique	16
1.3.3.1 Le bruit de l'amplificateur.....	17
1.3.4 Coupleur passif	18
1.4 L'ingénierie d'un réseau optique.....	18
1.4.1 Marge et budget de puissance	18
1.5 Les Architectures de réseaux.....	19
1.5.1 Topologie	19
1.5.2 Classification des réseaux.....	20
1.5.3 Protection	22
1.5.4 Métrologie des réseaux	23
1.6 Le concept de réseau sans filtre.....	24
CHAPITRE 2 LE SIMULATEUR DE RÉSEAUX SANS FILTRE.....	27
2.1 Plateforme de modélisation	27
2.1.1 OMNeT++.....	27
2.1.2 Le Framework INET.....	28
2.1.3 Le simulateur PhoenixSim.....	28
2.1.4 Les routeurs GMPLS	28
2.1.5 Le simulateur réseau sans filtre (FiNetSim)	29
2.2 Représentation et nomenclature de l'architecture	30
CHAPITRE 3 MODÉLISATION DE LA COUCHE PHYSIQUE.....	41
3.1 Modèle signal sur bruit.....	41
3.2 Composantes.....	43

3.2.1	Transmetteur.....	44
3.2.2	Coupleur optique.....	45
3.2.3	Fibre optique.....	46
	3.2.3.1 Dispersion chromatique.....	46
	3.2.3.2 Atténuation.....	48
	3.2.3.3 Effets non linéaires.....	49
3.2.4	Amplificateur.....	50
	3.2.4.1 Le modèle des amplificateurs.....	50
	3.2.4.2 Modèle de la dynamique des amplificateurs.....	53
	3.2.4.3 Paramétrisation des amplificateurs optiques.....	58
3.2.5	Récepteur.....	62
	3.2.5.1 Récepteur PIN.....	62
	3.2.5.2 Paramétrisation des récepteurs DQPSK.....	65
CHAPITRE 4	MODÉLISATION DE LA COMMUNICATION.....	69
4.1	Définition des paramètres de métrologie au niveau réseau.....	69
4.2	Modélisation de la communication.....	73
4.3	Le plan de contrôle.....	80
	4.3.1 Initialisation.....	81
	4.3.2 La découverte des voisins.....	84
	4.3.3 Signalisation, routage et gestion des ressources locales.....	87
	4.3.4 <i>Open Shortest Path First (OSPF)</i>	92
	4.3.5 Assignation des longueurs d'onde.....	93
CHAPITRE 5	RÉSULTATS DES SIMULATIONS.....	95
5.1	Étude du réseau allemand 7 nœuds.....	95
	5.1.1 Étude du réseau allemand à 7 nœuds en fonction de la matrice de trafic.....	95
	5.1.2 Étude du réseau allemand à 7 nœuds en fonction de la topologie.....	123
CONCLUSION	149
APPENDICES	153
LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	155

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1 Le taux d'erreur sur les bits (BER) avant et après correction d'erreurs sans circuit de retour (FEC). Calculé à partir de l'équation (3.14)	14
Tableau 2.1 Les quatre types de contact qui peuvent exister dans l'architecture des réseaux sans filtre avec respectivement le nombre de récepteurs, de transmetteurs, d'entrées, de sorties et, pour chacun, l'appellation du contact	32
Tableau 3.1 Paramètres spectraux selon l'espacement des canaux dans la grille ITU	42
Tableau 3.2 Exemple des paramètres de transmetteurs avec la correspondance dans le simulateur	44
Tableau 3.3 Paramètres de la fibre optique et la correspondance dans le simulateur	47
Tableau 3.4 Causes des variations rapides de puissance Tiré de Zyskind (2011, p. 203)	55
Tableau 3.5 Exemple des paramètres d'un amplificateur optique avec gain nivelé et leurs correspondances dans le simulateur. Les paramètres transitoires sont avec ajout et extraction de 16 dB de puissance (Oclaro)	58
Tableau 3.6 Paramètres utilisés par VPI pour caractériser les amplificateurs EDFA	60
Tableau 3.7 Exemple des paramètres de récepteurs avec la correspondance dans le simulateur ...	65
Tableau 4.1 Message photonique pour communication dans la couche physique avec les différents types de messages agissant de manière spécifique sur les composantes et le signal	74
Tableau 4.2 Exemple de propagation des différents messages ayant rapport à la couche physique d'un lien et agissant directement sur cette dernière telle qu'à la Figure 4.3	76
Tableau 4.3 (Suite) Exemple de propagation des différents messages ayant rapport à la couche physique d'un lien et agissant directement sur cette dernière telle qu'à la Figure 4.3	77
Tableau 4.4 Transmission d'un paquet de type Ethernet traversant la couche physique par encapsulation et démontrant la séparation entre la couche physique et les couches supérieures	78

Tableau 4.5 Type de message existant dans le simulateur pour toutes les communications électroniques.....	78
Tableau 4.6 Structure des paquets entre le contrôleur des interfaces et les transmetteurs-récepteurs.....	79
Tableau 4.7 Message entre le contrôleur des interfaces et les transmetteurs-récepteurs. Tous les messages sont envoyés avec un délai minimal d'un cycle de processeur de $1.0 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$ (clockRate_data).....	80
Tableau 4.8 Structure des paquets entre le contrôleur du nœud et les interfaces.....	83
Tableau 4.9 Types de message entre le contrôleur du nœud et les interfaces.....	84
Tableau 4.10 Structure des paquets du protocole LD pour faire la découverte de la topologie transparente. Les paquets ont une longueur totale de 91 octets.....	85
Tableau 4.11 Type de message du protocole LD impliqué dans la découverte de la topologie transparente.....	86
Tableau 4.12 Structure des paquets du RSVP-TE pour faire la gestion des ressources. Les paquets ont une longueur totale de 133 octets.....	88
Tableau 4.13 Types de message du protocole RSVP-TE.....	89
Tableau 4.14 Réponses possibles dans l'établissement d'une connexion optique.....	89
Tableau 4.15 Exemple de table de routage à un instant donné dans le nœud 2.....	91
Tableau 5.1 Nombre de composants photoniques formant les réseaux allemands JOCN 7 en fonction du multiple de la matrice de trafic unitaire de 1 à 12. La dernière rangée correspond au coût approximatif de chacune des composantes.....	96
Tableau 5.2 Solutions sans filtre statiques pour les douze multiples.....	98
Tableau 5.3 Le nombre d'arbres de fibres optiques et le degré à chacun des nœuds correspondant au réseau.....	98
Tableau 5.4 Comparaison des paramètres globaux du réseau pour chacun des multiples de trafic à un ratio d'utilisation faible ($\rho = 1$).....	121
Tableau 5.5 Probabilité de blocage due à respectivement un BER après FEC supérieur à 10^{-6} , à 10^{-9} et à 10^{-12} pour chacun des multiples de trafic à un ratio d'utilisation faible ($\rho = 1$).....	121

Tableau 5.6 Classement des réseaux avec multiples de trafic selon le paramètre global à un ratio d'utilisation faible ($\rho = 1$)	121
Tableau 5.7 Comparaison des paramètres globaux du réseau pour chacun des multiples de matrice de trafic à un ratio d'utilisation élevé ($\rho = 165$)	122
Tableau 5.8 Probabilité de blocage due à respectivement un BER après FEC supérieur à 10^{-6} , à 10^{-9} et à 10^{-12} pour chacun des multiples de trafic à un ratio d'utilisation élevé (moyenne de $\rho = 100 \dots 165$)	122
Tableau 5.9 Le ratio d'utilisation du réseau, le trafic moyen dans le réseau, la probabilité de blocage par non disponibilité de transmetteur, la probabilité de blocage par non disponibilité de récepteurs et la probabilité de blocage par non disponibilité de canal lorsque la probabilité de blocage total de 2% est atteinte pour chacun des multiples de trafic	123
Tableau 5.10 Classement des réseaux avec multiples de trafic selon le paramètre global à un ratio d'utilisation élevé ($\rho = 165$)	123
Tableau 5.11 Solutions sans filtre statiques pour les six solutions du réseau allemand à 7 nœuds choisies pour l'étude en fonction de la topologie des arbres	127
Tableau 5.12 Le nombre d'arbres de fibres optiques et le degré à chacun des nœuds correspondant pour les six solutions de réseau.....	127
Tableau 5.13 Comparaison des paramètres globaux du réseau pour les six solutions du réseau allemand à 7 nœuds à un ratio d'utilisation faible ($\rho = 1$)	145
Tableau 5.14 Probabilité de blocage due à respectivement un BER après FEC supérieur à 10^{-6} , à 10^{-9} et à 10^{-12} pour les six solutions du réseau allemand à 7 nœuds à un ratio d'utilisation faible ($\rho = 1$)	145
Tableau 5.15 Classement des six solutions du réseau allemand à 7 nœuds selon le paramètre global à un ratio d'utilisation faible ($\rho = 1$)	146
Tableau 5.16 Comparaison des paramètres globaux des six solutions du réseau allemand à 7 nœuds à un ratio d'utilisation élevé ($\rho = 49$)	146
Tableau 5.17 Probabilité de blocage due à respectivement un BER après FEC supérieur à 10^{-6} , à 10^{-9} et à 10^{-12} pour les six solutions du réseau allemand à 7 nœuds à un ratio d'utilisation élevé ($\rho = 49$)	146

Tableau 5.18 Le ratio d'utilisation du réseau, le trafic moyen dans le réseau, la probabilité de blocage par non disponibilité de transmetteur, la probabilité de blocage par non disponibilité de récepteur et la probabilité de blocage par non disponibilité de canal lorsque la probabilité de blocage total de 2% est atteint pour les six solutions du réseau allemand à 7 nœuds.....	147
Tableau 5.19 Classement des six solutions du réseau allemand à 7 nœuds selon le paramètre global à un ratio d'utilisation élevé ($\rho = 49$)	147

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1 Catégorisation de la provenance de différente dégradation de la couche physique Adaptée de Saradhi et Subramaniam (2009)	4
Figure 1.2 Différents types de topologies que peut prendre un réseau	21
Figure 1.3 Classification des différents réseaux optiques : grande distance, métropolitain et d'accès Adaptée de Gumaste et Antony (2003)	21
Figure 1.4 Solution sans filtre à trois arbres de fibres optiques du réseau allemand à 7 nœuds démontrant la pleine connectivité faite à partir de coupleurs passifs et de fibres optiques. Chacune des couleurs représente un arbre de fibres optiques distinct	26
Figure 2.1 Représentation d'une solution sans filtre du réseau allemand à 17 nœuds dans le simulateur OMNeT++	30
Figure 2.2 Représentation par le simulateur OMNeT++ de la connectivité interne dans les nœuds 6 (gauche) et 8 (droite) dans la solution du réseau allemand à 17 nœuds	31
Figure 2.3 Illustration de la pleine connectivité du nœud 8 du réseau allemand à 17 nœuds avec la nomenclature correspondante selon le contact. Les transmetteurs sont rouges et les récepteurs sont verts	34
Figure 2.4 Contact de type 1 (gauche) et de type 2 (droite) correspondant, respectivement, aux contacts 32 et 31 du nœud 6 du réseau allemand à 17 nœuds	37
Figure 2.5 Contact de type 3 (gauche) et de type 4 (droite) correspondant, respectivement, aux contacts 38 et 37 du nœud 6 du réseau allemand à 17 nœuds	38
Figure 2.6 Lien optique totalisant 353 km partant du nœud 6 jusqu'au nœud 11, démontrant les cinq segments amplifiés de 71 km	38
Figure 2.7 Composition des modules transmetteurs (gauche) et récepteurs (droite) faisant partie de la modélisation de la couche physique. Les cartes matérielles représentent l'interface réseau (NIF) entre le contrôleur du nœud et les émetteurs-récepteurs	39
Figure 2.8 Relation entre le contrôleur établi à chaque nœud et interfaces réseau connectées directement à la couche physique	40

XVIII

Figure 3.1 Représentation du signal et du bruit pour le modèle signal sur bruit correspondant à une représentation hypothétique de 7 canaux sur une grille avec 800 GHz d'espacement.....	43
Figure 3.2 Courbe d'atténuation de la fibre optique Corning SMF-28 interpolée sur la grille ITU déterminée à partir de la matrice de prédiction.....	49
Figure 3.3 Courbe de gain (bleu) et puissance des émissions spontanées amplifiées (rouge), typiques des amplificateurs optiques à l'erbium. Les courbes sont obtenues avec une puissance de pompage avant de 8 mW sur 14 m de fibre optique Adaptée de Becker, Olsson et Simpson (1999).....	52
Figure 3.4 Sept canaux avant (bleu) et après l'EDFA (rouge) et avant l'égalisateur ainsi que le bruit ASE correspondant aux mêmes conditions de la figure précédente	52
Figure 3.5 Rapport signal sur bruit optique après l'égalisation.....	53
Figure 3.6 Variation de puissance d'un canal survivant lorsque 7 des 8 canaux sont extraits puis ajoutés après 1, 5 et 10 amplificateurs en cascade Tiré de Qian et Chongcheng (© 1999 IEEE)	54
Figure 3.7 Variation de puissance d'un canal survivant lorsque 4 des 8 canaux sont extraits puis ajoutés après 1, 5 et 10 amplificateurs en cascade Tiré de Qian et Chongcheng (© 1999 IEEE)	55
Figure 3.8 Exemple de variation de la puissance en fonction du temps à l'extraction de canal, démontrant les quatre événements fixés en temps dans le simulateur, lesquels résultent en une propagation de l'effet transitoire et un effet sur la qualité de la transmission.....	57
Figure 3.9 Montage VPI pour effectuer la caractérisation des amplificateurs.....	59
Figure 3.10 Visualisation des résultats de la caractérisation de l'amplificateur optique à l'aide de deux matrices de caractérisation tridimensionnelles pour -9.5 dBm à la puissance par canal de sortie cible.....	61
Figure 3.11 Montage VPI pour effectuer la caractérisation du BER dans un système amplifié avec transmetteurs-récepteurs DQPSK à 46 Gb/s.....	66
Figure 3.12 Caractérisation du BER pour un système à DQPSK à 1550 nm. L'axe de x correspond à la puissance d'entrée du signal alors que l'axe de y, à la puissance du bruit. La couleur est la valeur correspondant à $-10 \log_{10}(BER)$ avant FEC.....	67
Figure 4.1 Exemple de l'interaction entre les différentes couches de protocoles et des éléments ..	73

Figure 4.2 Objet C++ PacketStat servant à communiquer les propriétés de la couche physique entre les éléments photoniques	75
Figure 4.3 Couche physique d'un lien optique servant comme démonstration de la propagation des messages.....	75
Figure 4.4 Connectivité point à point du plan de contrôle du réseau allemand à 17 nœuds dans le statut d'initialisation	82
Figure 4.5 Le réseau allemand à 17 nœuds en train de faire la découverte de sa topologie optique transparente. C'est au tour du nœud 11 de continuer la découverte de la topologie transparente.....	87
Figure 5.1 Solution sans filtre du réseau JOCN allemand à 7 nœuds composée de 3 arbres de fibres optiques avec un ratio de protection de 71 %.....	96
Figure 5.2 Moyenne du trafic en fonction du ratio d'utilisation pour différents multiples de matrice de trafic unitaire.....	99
Figure 5.3 Trafic maximal (paramètre A de l'ajustement analytique) à gauche en fonction du multiple de la matrice de trafic unitaire et le ratio d'utilisation à la demi-charge de trafic maximale (Paramètre R0 de l'ajustement analytique) à droite en fonction du multiple de la matrice de trafic unitaire.....	100
Figure 5.4 Coût total du réseau conçu en fonction du multiple de la matrice de trafic unitaire (gauche) et le coût total du réseau en fonction de la moyenne du trafic maximal dynamique qu'il peut supporter (droite). Le trafic est relié au multiple de la matrice de trafic unitaire lors de la conception	100
Figure 5.5 Trafic théorique moyen sur le réseau, lorsque limité par le nombre de transmetteurs en fonction du ratio d'utilisation et du multiple de matrice de trafic. La limite des arbres de fibres optiques complets y est aussi montrée (mauve).....	101
Figure 5.6 Latence moyenne des connexions établies en fonction du ratio d'utilisation et du multiple de matrice de trafic unitaire.....	102
Figure 5.7 Probabilité de blocage total (incluant la probabilité de blocage de transmetteur, de récepteur et de canal non disponibles) de chacun des nœuds et du réseau entier en fonction du ratio d'utilisation pour chacun des multiples d'une matrice de trafic unitaire	103
Figure 5.8 Probabilité de blocage par non disponibilité de transmetteur de chacun des nœuds et du réseau entier en fonction du ratio d'utilisation pour chacun des multiples d'une matrice de trafic unitaire.....	104

Figure 5.9 Probabilité de blocage par non disponibilité de récepteur de chacun des nœuds et du réseau entier en fonction du ratio d'utilisation pour chacun des multiples d'une matrice de trafic unitaire.....	105
Figure 5.10 Probabilité de blocage par non disponibilité de longueur d'onde sur les arbres de chacun des nœuds et du réseau entier en fonction du ratio d'utilisation pour chacun des multiples d'une matrice de trafic unitaire	106
Figure 5.11 Probabilité de blocage par non disponibilité de transmetteur théorique en fonction du ratio d'utilisation pour chacun des multiples de matrice de trafic unitaire	108
Figure 5.12 Temps moyen de préparation d'une demande de connexion en fonction du ratio d'utilisation pour chacun des multiples de matrice de trafic unitaire	109
Figure 5.13 Le ratio d'utilisation moyen des transmetteurs à chacun des nœuds en fonction du ratio d'utilisation pour chacun des multiples de matrice de trafic, tel que défini par l'équation (4.11).....	111
Figure 5.14 Le ratio d'utilisation moyen des récepteurs à chacun des nœuds en fonction du ratio d'utilisation pour chacun des multiples de matrice de trafic unitaire, tel que défini par l'équation (4.12)	112
Figure 5.15 Le ratio d'utilisation de canaux (<i>treeUtil</i>) pour chacun des arbres de fibres optiques en fonction du ratio d'utilisation pour chacun des multiples de matrice de trafic unitaire	113
Figure 5.16 Ratio de l'utilisation moyenne des canaux (<i>networktreeUtil</i>) par rapport à l'ensemble des tous les arbres de fibres optiques et connus globalement par le simulateur en fonction du ratio d'utilisation pour chacun des multiples de matrice de trafic.....	114
Figure 5.17 Le ratio d'utilisation des canaux par chaque connexion (<i>linkUtil</i>) connue par le plan de contrôle de chacun des nœuds et moyennée sur tout le réseau en fonction du ratio d'utilisation pour chacun des multiples de trafic	114
Figure 5.18 Le trafic normalisé à chacun des nœuds (<i>nodeTraffic</i>) en fonction du ratio d'utilisation pour chacun des multiples de matrice de trafic.....	115
Figure 5.19 BER avant FEC pour les canaux de données en fonction du ratio d'utilisation de 1 à 160. Le BER est exprimé par $-10 \log_{10}(\text{BER})$	117
Figure 5.20 BER avant FEC pour les canaux de données en fonction du ratio d'utilisation de 1 à 20. Même résultats qu'à la figure précédente. Le BER est exprimé par $-10 \log_{10}(\text{BER})$	118

Figure 5.21 Probabilité de blocage pour un BER après FEC supérieur à 10^{-6} pour les canaux de données en fonction du ratio d'utilisation pour chacun des multiples de matrice de trafic	118
Figure 5.22 Probabilité de blocage pour un BER après FEC supérieur à 10^{-9} pour les canaux de données en fonction du ratio d'utilisation pour chacun des multiples de matrice de trafic	119
Figure 5.23 Probabilité de blocage pour un BER après FEC supérieur à 10^{-12} pour les canaux de données en fonction du ratio d'utilisation pour chacun des multiples de matrice de trafic	119
Figure 5.24 Les six solutions sans filtre du réseau allemand à 7 nœuds choisies pour l'étude en fonction de la topologie des arbres de fibres optiques	125
Figure 5.25 Moyenne du trafic en fonction du ratio d'utilisation pour les six solutions du réseau allemand à 7 nœuds choisies pour l'étude en fonction de la topologie des arbres de fibres optiques	128
Figure 5.26 Latence moyenne des connexions établies en fonction du ratio d'utilisation pour les six solutions du réseau allemand à 7 nœuds choisies pour l'étude en fonction de la topologie des arbres de fibres optiques	129
Figure 5.27 Probabilité de blocage total (incluant la probabilité de blocage par non disponibilité de transmetteur, de récepteur et de canal) de chacun des nœuds et du réseau entier en fonction du ratio d'utilisation pour les six solutions du réseau allemand à 7 nœuds	130
Figure 5.28 Probabilité de blocage par non disponibilité de transmetteur de chacun des nœuds et du réseau entier en fonction du ratio d'utilisation pour les six solutions du réseau allemand à 7 nœuds	131
Figure 5.29 Probabilité de blocage par non disponibilité de récepteur de chacun des nœuds et du réseau entier en fonction du ratio d'utilisation pour les six solutions du réseau allemand à 7 nœuds	132
Figure 5.30 Probabilité de blocage par non disponibilité de longueur d'onde sur les arbres de chacun des nœuds et du réseau entier en fonction du ratio d'utilisation pour les six solutions du réseau allemand à 7 nœuds	133
Figure 5.31 Temps de préparation moyen d'une demande de chemin lumineux en fonction du ratio d'utilisation pour les six solutions du réseau allemand à 7 nœuds	134

Figure 5.32 Le ratio d'utilisation moyen des transmetteurs à chacun des nœuds et du réseau entier en fonction du ratio d'utilisation pour les six solutions du réseau allemand à 7 nœuds, tel que défini par l'équation (4.11) du mémoire	136
Figure 5.33 Le ratio d'utilisation moyen des récepteurs à chacun des nœuds et du réseau entier en fonction du ratio d'utilisation pour les six solutions du réseau allemand à 7 nœuds, tel que défini par l'équation (4.12) du mémoire	137
Figure 5.34 Le ratio d'utilisation des canaux (<i>treeUtil</i>) pour chaque arbre de fibres optiques avec couleurs correspondant à celles de la Figure 5.24 en fonction du ratio d'utilisation pour les six solutions du réseau allemand à 7 nœuds	138
Figure 5.35 L'utilisation moyenne des canaux (<i>networktreeUtil</i>) exprimé en ratio par rapport au nombre total de canaux disponible sur tous les arbres de fibres optiques en fonction du ratio d'utilisation pour les six solutions du réseau allemand à 7 nœuds.....	139
Figure 5.36 L'utilisation moyenne des canaux par chaque connexion (<i>linkUtil</i>) connue par le plan de contrôle de chacun des nœuds et moyennée sur tout le réseau en fonction du ratio d'utilisation pour les six solutions du réseau allemand à 7 nœuds	140
Figure 5.37 Le trafic normalisé à chacun des nœuds (<i>nodeTraffic</i>) en fonction du ratio d'utilisation pour les six solutions du réseau allemand à 7 nœuds	141
Figure 5.38 BER avant FEC pour les canaux de données en fonction du ratio d'utilisation pour les six solutions du réseau allemand à 7 nœuds. Le BER est exprimé par $-10 \log_{10}(\text{BER})$	142
Figure 5.39 Probabilité de blocage pour un BER après FEC supérieur à 10^{-6} pour les canaux de données en fonction du ratio d'utilisation pour les six solutions du réseau allemand à 7 nœuds	143
Figure 5.40 Probabilité de blocage pour un BER après FEC supérieur à 10^{-9} pour les canaux de données en fonction du ratio d'utilisation pour les six solutions du réseau allemand à 7 nœuds	143
Figure 5.41 Probabilité de blocage pour un BER après FEC supérieur à 10^{-12} pour les canaux de données en fonction du ratio d'utilisation pour les six solutions du réseau allemand à 7 nœuds	144

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

WDM	Wavelength Division Multiplexing
CWDM	Coarse Wavelength-Division Multiplexing
DWDM	Dense Wavelength-Division Multiplexing
OADM	Optical Add-Drop Multiplexer
ROADM	Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexer
MEMS	Micro Electro Mechanical Systems
OXC	Optical Cross-Connect
WSS	Wavelength Selective Switching
DCU	Dispersion Compensation Unit
OSNR	Optical Signal to Noise Ratio
SNR	Signal to Noise Ratio
NRZ	Non-Return-to-Zero
RZ	Return-to-Zero
DQPSK	Differential Quadrature Phase-Shift Keying
DPQPSK	Dual-Polarization Quadrature Phase Shift Keying
GVD	Group Velocity Dispersion
ASE	Amplified Spontaneous Emission
EDFA	Erbium Doped Fibre Amplifier
SBS	Stimulated Brillouin Scattering
SRS	Stimulated Raman Scattering

SPM	Self-Phase Modulation
XPM	Cross-Phase Modulation
FWM	Four-Wave Mixing
PMD	Polarization Mode Dispersion
BER	Bit Error Rate
FEC	Forward Error Correction
CD	Chromatic Dispersion
DSP	Digital Signal Processing
DGFF	Dynamic Gain Flattening Filter
VPI	Virtual Photonics Inc.
LAN	Local Area Network
SONET	Synchronous optical network
SDH	Synchronous Digital Hierarchy
OTN	Optical Transport Network
GMPLS	Generalized Multi-Protocol Label Switching
UDP	User Datagram Protocol
TCP	Transmission Control Protocol
IP	Internet Protocol
RSVP-TE	Resource Reservation Protocol - Traffic Engineering
ISP	Internet Service Provider
ITU	International Telecommunication Union
SLA	Service Level Agreement

NED	Network Description Language
RWA	Routing and Wavelength Assignment
PCE	Path Computation Element
OSPF	Open Shortest Path First
JOCN	Journal of Optical Communications and Networking

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

UNITÉS DE BASE

m	mètre (unité de longueur)
nm	nanomètre (10^{-9} m)
km	kilomètre (10^3 m)

UNITÉ DE TEMPS

s	seconde
ms	milliseconde (10^{-3} s)
μ s	microseconde (10^{-6} s)

UNITÉS DE PUISSANCE OPTIQUE

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

SYMBOLE

λ	longueur d'onde
σ_λ	largeur spectrale
P	puissance optique
α	coefficient d'atténuation
n_2	indice de réfraction non linéaire
c	vitesse de la lumière
e	charge d'un électron
k_B	constante de Boltzman
γ	coefficient de gain non linéaire
\mathfrak{R}	responsivité
ρ	ratio d'utilisation
λ	taux des arrivées
μ	taux des départs
w	poids assigné à une métrique

INTRODUCTION

Ce mémoire expose les détails des spécifications du simulateur de réseaux sans filtre, FiNetSim, actuellement en développement au Laboratoire de technologies de réseaux de l'École de technologie supérieure avec le partenaire industriel Ciena. L'objectif est de modéliser les réseaux sans filtre dans OMNeT++ avec l'objectif final d'établir un plan de contrôle au courant des limitations de la couche physique et de la disposition de celle-ci afin d'offrir une architecture réseau de flexibilité accrue.

Le plan de contrôle final aura un objectif similaire à celui des travaux de (Chava et al., 2010; Chava et al., 2009; Cugini et al., 2008), qui ont démontré que le blocage de longueur d'onde peut être dû, entre autres, aux effets linéaires et non linéaires et non seulement au manque de longueur d'onde. Précisément, l'ajout d'une nouvelle longueur d'onde peut être impossible à cause des longueurs d'onde déjà existantes dans le réseau ou encore, de l'influence de l'ajout de la nouvelle longueur d'onde sur les connexions déjà existantes. Ce concept s'applique directement aux réseaux sans filtre. Donc, dans ce mémoire, on retrouve les détails du développement d'un modèle plus simple: sur les plans de contrôle de la faisabilité et du calcul rapide, et d'un autre modèle plus détaillé qui simulent la réalité de la transmission dans le domaine optique afin de valider un plan de contrôle.

Les présents travaux ont aussi pour but d'analyser davantage l'architecture des réseaux sans filtre en proposant une spécification ainsi que d'en faire une étude dynamique de ce type de réseau. À partir de cette spécification, le simulateur de réseaux optiques a été développé. Au premier chapitre de ce mémoire, un rappel sur les différentes architectures de réseaux optiques ainsi que les composantes dont ils sont constitués est présenté. Le lien et les différences qui s'appliquent aux réseaux optiques sans filtre sont aussi effectués.

Au deuxième chapitre, la plateforme de simulation est présentée et expliquée dans tous ses détails. Ensuite, les spécifications de l'architecture sont présentées, ainsi que la nomenclature qui a été développée afin de faciliter le développement du simulateur sur la base de celle utilisée pour des réseaux ROADM conventionnels et dans la documentation de Ciena. Le modèle d'ingénierie de la liaison, à partir de solutions sans filtre, est aussi introduit.

Au chapitre trois, on voit la modélisation de la couche physique, à l'aide du calcul du modèle rapport signal sur bruit optique. Au chapitre quatre, on explique la modélisation de la communication pour ensuite introduire un prototype de plan de contrôle de cette nouvelle architecture.

Finalement, au dernier chapitre, nous présentons les résultats de simulations dynamiques, qui incluent la couche physique, du point de vue de l'influence des limitations cette couche sur le plan de contrôle.

CHAPITRE 1

RÉSEAUX OPTIQUES SANS FILTRE

Dans ce chapitre, nous examinons, d'abord, les limitations imposées par la fibre optique et suivant avec les éléments qui constituent un réseau de multiplexage par répartition en longueur d'onde (WDM). Par la suite, les différentes topologies et architectures sont explorées pour faire le lien entre les réseaux traditionnels et les réseaux optiques sans filtre.

1.1 Multiplexage par répartition en longueur d'onde (WDM)

Le multiplexage par répartition en longueur d'onde (WDM) est une méthode pour augmenter la quantité d'information transmise dans la fibre optique. Il s'agit de transmettre l'information sur différentes longueurs d'ondes émises par les lasers sur cette même fibre optique. Chaque longueur d'onde se nomme un canal et son injection dans la fibre se fait au moyen d'un multiplexeur. Les canaux sont répartis sur trois fenêtres différentes séparées là où l'atténuation du signal est faible. Ces trois différentes bandes se trouvent aux alentours des longueurs d'ondes de 980 nm, 1310 nm et 1500 nm. Dans les standards émis par l'Union internationale des télécommunications (ITU, 2002), chaque canal est séparé par 12.5, 25, 50 ou 100 GHz, selon la grille utilisée.

1.2 Les limitations imposées par la fibre optique

Idéalement, toute communication serait établie sur des canaux parfaits qui ne présenteraient aucune dégradation du signal. Mais la réalité fait en sorte que la fibre optique impose des limitations, tel qu'exposé dans les sous-sections suivantes.

1.2.1 Les pertes dans la fibre optique

Bien que la fibre optique monomode soit un médium de transmission de choix pour de grandes distances et une grande quantité d'information, elle a aussi ses limitations. Les pertes dans la fibre optique sont principalement dues à l'atténuation et à la dispersion. La dispersion n'atténue pas le signal, mais plutôt engendre un élargissement de l'impulsion qui devient un facteur important à débit élevé. À débit élevé, il y a possibilité de chevauchement des bits, dû à l'élargissement de l'impulsion, pouvant causer des erreurs de transmission. Finalement, des effets non linéaires causent des dégradations importantes aux débits élevés. De plus ces dégradations sont encore plus marquées à une puissance d'injection trop élevée limitant celle-ci. Elles sont difficiles à prédire rendant donc leur compensation aussi difficile à réaliser. La Figure 1.1 résume graphiquement et de façon catégorisée les différents effets provenant de la couche physique, qui dégradent la transmission.

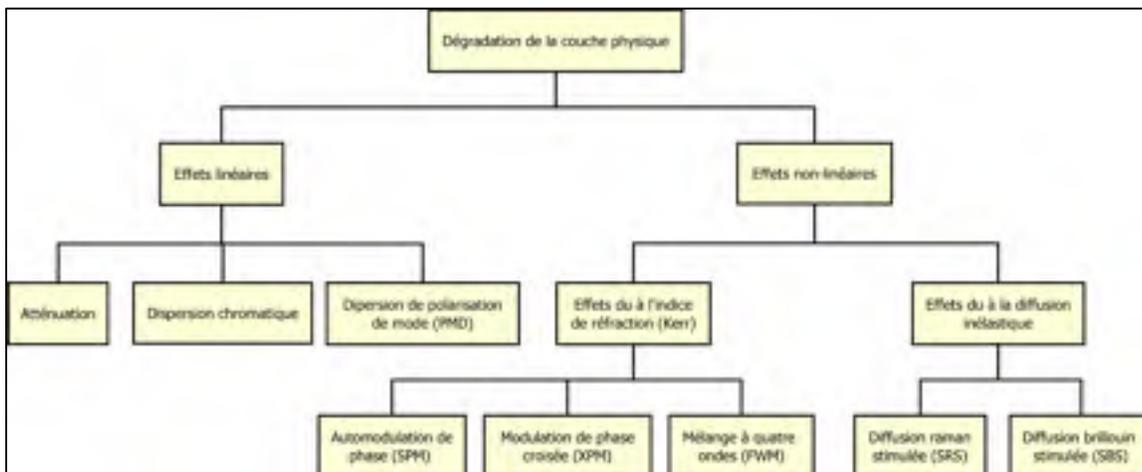


Figure 1.1 Catégorisation de la provenance de différente dégradation de la couche physique

Adaptée de Saradhi et Subramaniam (2009)

1.2.1.1 Atténuation

L'atténuation se définit comme étant l'accumulation de la perte de puissance optique, de la source jusqu'à la réception (Gumaste et Antony, 2003). Elle provient des pertes dues à l'absorption du matériel, à la diffusion de Rayleigh ainsi que de la perte par courbure. La perte par courbure est prédictible et peut être facilement évitée, par conséquent, ce facteur ne sera plus mentionné dans ce mémoire. Aucune fibre optique de silice n'est totalement pure et parfaite. L'absorption est causée par les impuretés provenant du matériel de base, du processus de fabrication et des imperfections. Aux courtes longueurs d'onde, l'absorption ultraviolette est dominante tandis qu'aux grandes longueurs d'onde, c'est l'absorption dans l'infrarouge qui domine. Pour minimiser les pertes, les bandes utiles d'opération se limitent donc à la courte bande (S), aux alentours de 1310 nm, à la longue bande (L), de 1570 nm à 1620 nm, et à la conventionnelle (C), de 1525 à 1565 (Gumaste et Antony, 2003). Puisque l'atténuation est un facteur important dans l'ingénierie de liaison, les fabricants manufacturiers de fibres optiques spécifient son paramètre, nommé le coefficient d'atténuation α , et donné par :

$$\alpha = -\frac{10}{L} \log_{10} \frac{P_2}{P_1} \quad [dB/km] \quad (1.1)$$

où P_1 et P_2 sont respectivement, la puissance d'entrée et de sortie et L est la longueur totale de la fibre optique. Il représente la perte du signal en décibel par kilomètre de fibre optique et s'exprime en dB/km.

La distance à laquelle la puissance diminue par un facteur de e dû à l'atténuation dans une fibre optique passive est définie par la *distance efficace* :

$$L_{eff} = \frac{1 - e^{-\alpha L}}{\alpha} \quad [m] \quad (1.2)$$

1.2.1.2 La dispersion dans la fibre optique

La vitesse de propagation des composantes spectrales de la lumière, lorsqu'elle se propage dans le vide, sont constantes et identiques pour chacune des composantes, alors que, dans la fibre optique, la vitesse de propagation dépend de la longueur d'onde. Deux types de dispersion existent : la dispersion chromatique et la dispersion des modes de polarisation. La dispersion chromatique est due à chacune des composantes qui voyagent à différentes vitesses (vitesse de groupe) et a comme effet d'élargir l'impulsion. La dispersion des modes de polarisation est une conséquence de l'imperfection de la géométrie cylindrique de la fibre optique. Les modes orthogonaux du signal se séparent et voyagent à différentes vitesses et à différentes phases. Les deux composantes se recombinent à la sortie, produisant ainsi, encore une fois, l'élargissement de l'impulsion. La dispersion chromatique est présente à tous les débits, mais son effet est négligeable à bas débits. Elle devient une dégradation majeure et elle est la dégradation linéaire la plus importante aux débits supérieurs à 2.5 Gb/s. Similairement, la dispersion des modes de polarisation devient un facteur limitant important sur de longues distances lorsque le débits dépassent les 40 Gb/s puisque les effets de deuxième ordre et supérieurs deviennent plus prononcés (Hui et O'Sullivan, 2009).

Comme c'est le cas avec l'atténuation, il faut tenir compte de la dispersion dans l'ingénierie de liaison. Les fabricants de fibre optique donnent, dans les spécifications, le coefficient de dispersion chromatique D . Celle-ci est déterminé en mesurant le décalage temporel des composantes de longueur d'onde d'une impulsion optique selon la relation suivante (Kartalopoulos, 2003):

$$|D| = \frac{\Delta\tau}{L\Delta\lambda} \quad (1.3)$$

où $\Delta\tau$ est le décalage en temps, L est la longueur totale de la fibre optique et $\Delta\lambda$ est la largeur spectrale optique du signal. Le coefficient de dispersion chromatique s'exprime généralement en $\text{ps}/\text{nm}\cdot\text{km}$.

La dispersion peut-être compensée à l'aide de fibres optiques à compensation de dispersion. Cette fibre optique a une courbe de dispersion négative comparativement à celle de la fibre optique normalement utilisée. La dispersion est renversée, mais la pénalité est que cette fibre optique a un coefficient d'atténuation plus élevé que la fibre optique conventionnelle. Ces pertes sont alors ajoutées au total des pertes d'atténuation. Donc, dépendamment du type de liaison, un plus grand nombre d'amplificateurs seront nécessaires, ce qui réduira davantage le rapport du signal sur bruit optique. La valeur typique de la tolérance pour la dispersion dans un récepteur commercial est environ $\pm 800 \text{ ps}/\text{nm}$, pour un signal sans retour à zéro, et $\pm 160 \text{ ps}/\text{nm}$, pour un signal optique duo binaire (Saradhi et Subramaniam, 2009). Grâce aux avancements de la conversion analogique numérique et du traitement numérique du signal à haute vitesse, il est maintenant possible de faire la compensation de la dispersion chromatique dans le domaine numérique et en temps réel (Taylor, 2004). Cette technique s'applique aussi à la dispersion des modes de polarisation (Roberts et al., 2009) décrite à la sous-section suivante. L'architecture des réseaux sans filtre utilise les derniers avancements du DSP, éliminant complètement le besoin d'utiliser les fibres optiques à compensation de dispersion.

1.2.1.3 La dispersion des modes de polarisation

Comme mentionné auparavant, la dispersion des modes de polarisation (PMD) provient principalement de l'asymétrie des axes d'une fibre optique et résulte en l'élargissement de l'impulsion parce que les différents modes de polarisation voyagent à différentes vitesses. Toutes les vibrations et tous les mouvements agissant sur les fibres optiques font varier la valeur instantanée de la PMD. Par exemple, les vents et les courants alternatifs (champ

magnétique) des fils électriques sur la fibre optique suspendue, donnent une corrélation à 0.3 Hz et 60 Hz (Chan, 2010). Aussi, la variation de la température peut faire varier cette asymétrie de manière à établir une corrélation avec la PMD. Puisque ces effets apparaissent de façon quasi aléatoire, la PMD est normalement tenue en compte dans la marge lors de l'élaboration du budget de puissance. Dans ce mémoire, ces effets sont ignorés puisqu'on s'intéresse à la dynamique provenant en grande partie des amplificateurs optiques. Mais, l'inclusion de ces effets peut être ajoutée dans le simulateur.

1.2.2 Les effets non linéaires

Les effets non linéaires proviennent de l'interaction de la lumière avec les atomes composant la fibre optique. Les effets causent des pertes de signal, créent du bruit, élargissent l'impulsion et engendrent de la diaphonie entre les canaux de transmission. Ils se classifient selon deux phénomènes physiques résultant des effets dus à la dépendance de l'indice de réfraction à la puissance (Kerr) et à la diffusion inélastique. La dépendance de l'indice de réfraction produit trois différents effets : l'auto modulation de phase (SPM), la modulation de phase croisée (XPM) et le mélange à quatre ondes (FWM). La diffusion inélastique apparaît au-dessus d'un certain seuil de puissance, où l'intensité de la lumière diffusée grandit exponentiellement, donnant les effets de diffusion Raman stimulée (SRS) et de diffusion Brillouin stimulée (SBS) (Saradhi et Subramaniam, 2009).

Les effets non linéaires ont une dépendance à la puissance du signal. À faible puissance, ils sont négligeables. Mais, à mesure que la puissance augmente, leurs effets deviennent plus apparents, surtout, lorsqu'on augmente également le débit de transmission des données, la distance et le nombre de longueurs d'onde, tout comme la densité des canaux (Saradhi et Subramaniam, 2009).

Ceci impose une limite à la puissance d'injection du signal et, par conséquent, à l'amplification optique. Il n'est donc pas toujours possible de simplement augmenter la puissance pour contrebalancer l'atténuation.

Le coefficient de gain non linéaire est un paramètre qui permet de quantifier la propriété de la fibre optique utilisée où les effets peuvent apparaître. Il est défini par :

$$\gamma = \frac{n_2 \omega_o}{c A_{eff}} \left[W^{-1} \cdot m^{-1} \right] \quad (1.4)$$

où n_2 est l'indice de réfraction non linéaire, ω_o est la fréquence angulaire du signal, A_{eff} est l'aire effective modale de la fibre optique et c est la vitesse de propagation de la lumière dans le vide.

À partir de ce coefficient, il est possible de calculer la *distance non linéaire*, définie comme la distance où les effets non linéaires provenant du SBS deviennent importants :

$$L_{NL} = \frac{1}{\gamma P_0} \quad (1.5)$$

où P_0 est la puissance d'injection initiale dans la fibre optique.

Le déphasage sur un canal résultant, de la modulation de phase croisée (XPM), peut être estimé à l'aide de la relation suivante (Mynbaev et Scheiner, 2000):

$$\Phi_1(XPM) = \gamma L_{eff} (P_1 + 2P_2 + \dots + 2P_n) \quad (1.6)$$

où $P_1 \dots P_n$ sont les puissances d'injection de chacun des canaux.

1.2.2.1 Impact du mélange à quatre ondes sur les réseaux sans filtre

Le phénomène du mélange à quatre ondes (FWM) doit être particulièrement pris en considération dans les réseaux de multiplexage par répartition en longueurs d'onde denses (DWDM). Cette prise en compte est encore plus vraie dans les réseaux sans filtre (grande probabilité d'utiliser tous les canaux de la grille ITU-T). Plus la densité de la longueur d'onde augmente, plus la diaphonie plus importante puisque:

- si l'on augmente la puissance optique de chaque canal, l'intensité du mélange à quatre ondes augmente aussi;
- si l'on augmente la densité des canaux, l'intensité du mélange à quatre ondes augmente aussi. (Kartalopoulos, 2003)

La diaphonie est induite par le mélange à quatre ondes et est donnée par la formule suivante (Kartalopoulos, 2003):

$$P_{ijk}(L) = \left(\frac{\eta}{9}\right) D^2 \gamma^2 P_i P_j P_k e^{-\alpha L} \left[\frac{(1 - e^{-\alpha L})^2}{\alpha^2} \right] \quad (1.7)$$

où P_i , P_j et P_k sont les puissances optiques des trois signaux d'entrée, L est la longueur de la fibre optique, α le coefficient d'atténuation, η est le rendement du mélange à quatre ondes, D est un facteur dégénératif et γ est le coefficient de gain non linéaire de la fibre optique donné par l'équation (1.4).

La diaphonie engendrée par le mélange à quatre ondes risque d'être paramètre important de métrologie à l'assignation d'une longueur d'onde pour établir la communication des réseaux sans filtre, surtout si la grille ITU est utilisée. À cause de la nature complexe du mélange à quatre ondes, une solution numérique traditionnelle exige beaucoup de ressource d'un processeur (Yu et al., 2000).

Une des stratégies suivantes peut minimiser le mélange à quatre ondes:

- utilisation d'une fibre optique à dispersion décalée non zéro, puisque la dispersion réduit cet effet;
- utilisation de canaux avec espacement non régulier de telle manière que les signaux générés n'interfèrent pas avec les signaux originaux;
- utilisation de canaux orthogonaux (Goldfarb, 2008; Saradhi et Subramaniam, 2009).

Maintenant que nous avons vu les facteurs physiques qui influencent et limitent la transmission de l'information dans une fibre optique, nous nous pencherons sur les composantes qui forment un réseau de multiplexage par répartition en longueurs d'onde (WDM).

1.3 Les composantes d'un réseau optique WDM

Dans cette section, nous discuterons les composantes qui forment un réseau optique WDM partant de l'émetteur jusqu'au récepteur, en passant par les composantes entre et dans les nœuds: le transmetteur, le récepteur, l'amplificateur et le coupleur passif.

1.3.1 Module d'émission optique : le transmetteur

Le laser est une source de lumière cohérente gardant l'intégrité de la modulation du signal sur de grandes distances. Le signal est modulé généralement de deux façons: la modulation directe ou la modulation externe. Dans la modulation directe, le courant qui alimente le laser est varié en fonction des données à transmettre. Cette variation du courant entraîne simultanément la variation de la puissance lumineuse de sortie. Ces variations sont limitées à des taux de bits inférieurs aux environs de 2.5 Gb/s, car la modulation de l'intensité engendre aussi une modulation de la phase (chirp) provenant de la dépendance de la densité de porteurs de charge sur l'indice de réfraction à l'intérieur de la cavité du laser (Hui et O'Sullivan, 2009). Pour des taux de bits supérieurs à 10 Gb/s, il est préférable de garder

l'intensité du laser constante et de moduler le signal en utilisant un modulateur optique. Ceci est la modulation externe.

Il est possible d'ajouter une cavité externe avec un gradient d'indice périodique permettant de tirer avantage des conditions de Bragg. On peut alors changer l'espacement (la périodicité), par exemple, en faisant varier l'angle d'incidence du faisceau qui effectivement fait varier l'espacement périodique. Cela rend possible le choix d'une longueur d'onde spécifique qui, par conséquent, devient préférentielle et dominante dans l'amplification de la cavité interne du laser. Le laser accordable, tel que la diode laser DFB, qui est un dispositif populaire dans la communication optique, permet d'ajuster la longueur d'onde émise du laser. Avec ce dispositif, il est possible de faire varier au-delà de 60 nm la longueur d'onde du laser dans la fenêtre de 1500 nm. Actuellement, les dispositifs commerciaux peuvent le faire en moins de 10 ms (Hui et O'Sullivan, 2009). Le laser accordable permet l'architecture de réseaux sans filtre, en déplaçant la commutation des nœuds aux transmetteur-récepteur, grâce à cette accordabilité.

1.3.1.1 Format de modulation

Il existe plusieurs formats de modulation dont chacun a ses avantages et ses désavantages. Le format de non-retour à zéro (NRZ) a l'avantage d'être simple à implémenter, mais il y a un risque de perte de synchronisme entre le transmetteur et le récepteur. Le format retour à zéro (RZ) apporte une solution, mais il est deux fois plus sensible aux chevauchements entre les bits transmis. Les formats tels que PSK et DQPSK font changer la phase du signal, permettant ainsi de mettre une plus grande quantité de symboles, dépendamment de la constellation de bits utilisée. Finalement, puisqu'il existe deux polarisations, un format tel que DP-QPSK utilise ces dernières séparément, ce qui, effectivement, double la quantité de symboles transmis.

1.3.2 Récepteur optique et sensibilité

La sensibilité d'un récepteur optique est très importante pour déterminer la qualité de transmission dans un réseau optique. Un paramètre de métrologie de performance pour quantifier la figure de qualité de transmission se nomme le taux d'erreur sur les bits (BER). Le taux d'erreur sur les bits se définit comme étant le rapport entre le nombre d'erreurs sur les bits durant la transmission sur le nombre total de bits transmis. La définition mathématique exacte du BER est la somme des probabilités que bit 1 soit reçu pour un bit 0 transmis et qu'un bit 0 soit reçu pour un bit 1 transmis (Gumaste et Antony, 2003):

$$BER = P(1)P(0/1) + P(0)P(1/0) \quad (1.8)$$

Chez les opérateurs de réseaux, un BER minimal acceptable est une valeur entre 10^{-9} et 10^{-12} . Les valeurs de BER inférieures à 10^{-12} sont normalement réservées pour les applications critiques, tels que celles du secteur financier. Si le BER est supérieur à l'un ou à l'autre, selon le cas, il peut être radicalement amélioré en utilisant la technique de correction d'erreurs sans circuit de retour (FEC), ce qui rend cette technique puissante, mais, au détriment de l'accroissement de la complexité. La réduction de données transmises, due au surcoût du protocole (« protocol overhead »), est d'environ 7 % et, dépendamment des systèmes, peut aller jusqu'à 30 % dans la transmission de données ultra longue distance. Le Tableau 1.1 montre la performance de la technique de correction d'erreurs sans circuit de retour.

En général, le BER est une quantité qui est difficile à mesurer à cause du temps nécessaire pour obtenir expérimentalement de bonnes statistiques. Un BER de 10^{-12} implique que, sur un taux de bit de 10 Gb/s, une erreur résulte à toutes les 100 secondes. Pour de bonnes statistiques, il faut au moins 100 erreurs (Hui et O'Sullivan, 2009), donc, environ trois heures pour chaque mesure et deux semaines pour un BER de 10^{-14} etc.

Tableau 1.1 Le taux d'erreur sur les bits (BER) avant et après correction d'erreurs sans circuit de retour (FEC).
Calculé à partir de l'équation (3.14)

Performance de la correction d'erreurs sans circuit de retour	
BER avant la FEC	BER après la FEC
10^{-3}	1.1×10^{-6}
10^{-4}	5.4×10^{-15}
10^{-5}	6.3×10^{-24}
10^{-6}	6.4×10^{-33}
10^{-7}	6.4×10^{-42}

Il est beaucoup plus facile de mesurer le BER indirectement à l'aide d'une quantité nommée le facteur Q d'un signal. Celui-ci est la qualité absolue d'un signal et il est donné par (Gumaste et Antony, 2003):

$$Q = \frac{I_1 - I_0}{\sigma_1 - \sigma_0} \quad (1.9)$$

où I_1 est le courant pour le bit 1, I_0 est le courant pour le bit 0, σ_0 et σ_1 sont respectivement l'écart-type de la déviation de leur fonction de densité. Le BER peut ensuite être relié au facteur Q par (Gumaste et Antony, 2003):

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{Q}{\sqrt{2}} \right) \quad (1.10)$$

Dans les systèmes de fibre optique, on suppose que le bruit généré par le récepteur est le facteur limitant principal dans la performance du récepteur et néglige le BER du signal

même. On parle alors de la sensibilité d'un récepteur qui est limitée par le bruit thermique, le bruit quantique du courant d'obscurité de la photodiode (Hui et O'Sullivan, 2009).

En pratique, puisqu'il y a plusieurs sources de bruit et de distorsion dans toute la ligne de transmission, le facteur Q peut être déduit à partir de mesures sur un diagramme de l'œil. Avec l'utilisation d'un masque de l'œil pour paramétrer la fermeture de l'œil, c'est-à-dire la pénalité de la fermeture de l'œil (ECP), nous pouvons calculer le facteur Q comme étant (Hui et O'Sullivan, 2009):

$$Q = \frac{(A-B)2\mathfrak{R}P_{ave}}{\sqrt{\sigma_{ind}^2 + \eta A 2P_{ave}} + \sqrt{\sigma_{ind}^2 + \eta B 2P_{ave}}} \quad (1.11)$$

où σ_{ind} est la variance du bruit indépendant du signal, η est un facteur de multiplication qui dépend du système provenant du bruit dépendant du signal. A et B représentent, respectivement, le point le plus bas de la partie supérieure de l'œil et le point le plus haut de la partie inférieure. Des travaux antérieurs de l'équipe (Savoie et al., 2010) ont caractérisé les paramètres A et B dans le cas de formats de modulation NRZ, cela, en fonction du couplage entre deux branches ainsi que de la distance de transmission. Les présents travaux prennent plutôt en compte la dépendance à la longueur d'onde, l'effet tunnel du bruit ainsi que les transmetteurs-récepteurs DQPSK. Une caractérisation similaire en termes de fermeture de l'œil temporel sera nécessaire dans des travaux futurs.

Pour tout type de signal, le rapport signal-bruit optique (OSNR) se définit comme étant le ratio de la puissance du signal optique sur la puissance du bruit optique :

$$OSNR = \frac{P_{signal_optique}}{P_{bruit_optique}} \quad (1.12)$$

Finalement, le facteur Q en fonction de la pénalité de la fermeture de l'œil et du rapport signal-bruit optique s'exprime comme étant (Hui et O'Sullivan, 2009):

$$Q = \frac{(\sqrt{A} - \sqrt{B})}{\sqrt{B_e}} \sqrt{OSNR} \quad (1.13)$$

Cette expression permet de déterminer facilement le facteur Q du système à partir de mesures.

1.3.3 Amplificateur optique

Un amplificateur optique amplifie un signal dans le domaine optique analogiquement à un amplificateur dans un circuit électronique. Il sert à amplifier le signal optique tant à la sortie de l'émetteur (amplificateur de puissance) après l'atténuation résultant de transmission sur de longues distances dans une fibre optique (amplificateur en ligne) ou, encore, avant un récepteur optique (préamplificateur). Les paramètres importants que l'on doit considérer comme essentiels lors de la sélection d'un amplificateur optique pour un système WDM sont la courbe spectrale de gain, la puissance à la sortie, la figure de bruit ainsi que la bande passante d'amplification (Gumaste et Antony, 2003).

Il existe trois types élémentaires d'amplificateur optique, mais nous sommes principalement intéressés par les amplificateurs de fibre optique dopée à l'Erbium (EDFA). Ce type d'amplificateur est utilisé couramment dans les systèmes DWDM, puisque leur fenêtre d'amplification se situe entre 1530 nm à 1565 nm. Cet amplificateur est relativement peu coûteux et permet une amplification complètement dans le domaine optique.

1.3.3.1 Le bruit de l'amplificateur

Un désavantage de l'utilisation d'un amplificateur optique est que non seulement le signal est amplifié mais le bruit aussi est amplifié. De plus, à cause de la nature de son opération, du bruit additionnel provenant de l'émission spontanée amplifiée (ASE) aléatoire est créé. La figure de mérite pour caractériser un amplificateur est définie comme étant (Gumaste et Antony, 2003):

$$NF = \frac{OSNR_{entrée}}{OSNR_{sortie}} \quad (1.14)$$

C'est-à-dire, le ratio de la puissance du signal optique à l'entrée de l'amplificateur sur la sortie de celui-ci.

Une façon simple et approximative de déterminer le OSNR dans une chaîne d'amplificateurs, la dégradation du signal sur bruit optique est:

$$OSNR_{Final} [dB] = 58.0 + P_{TX} [dBm] - G_{dB} - NF_{dB} - 10 \log_{10} N_{OA} \quad (1.15)$$

où P_{TX} est la puissance du transmetteur en dBm, G_{dB} est le gain du premier amplificateur, NF_{dB} est la figure de bruit du premier amplificateur et N_{OA} est le nombre d'amplificateurs dans la série. Cette approximation ne prend pas en compte la courbe spectrale du gain et du bruit, la variation de l'amplification aux différents endroits ainsi que la dépendance de l'atténuation dans la fibre optique avec la longueur d'onde. Elle est surtout utile pour déterminer le pire canal et non pour l'établissement d'un plan de contrôle au courant des limitations de la couche physique.

1.3.4 Coupleur passif

Le coupleur passif est une composante simple, mais est aussi la clé du design sans filtre. Il est peu coûteux et très simple à manufacturer en fusionnant deux fibres optiques sur une courte distance. Ceci permet d'échanger la puissance optique d'un signal sur l'autre fibre optique et vice-versa. Pour un coupleur passif 50-50, la moitié de la puissance du signal est transférée sur l'autre branche du coupleur, ce qui est équivalent à une réduction minimale du signal aux environs 3.2 dB. Il peut servir également de diviseur ou de combineur optique, dépendamment de la configuration et de la direction des signaux.

1.4 L'ingénierie d'un réseau optique

Dans les sections précédentes, nous avons vu qu'il est possible de former des liens de transmission avec et entre les composantes et, plus particulièrement, celles utilisées dans un réseau de type sans filtre. Lors de l'ingénierie d'un réseau optique, il faut tenir compte de la manière dont l'interaction des composantes va influencer la performance réelle du réseau en comparaison avec celle désirée. Une approche pour effectuer une ingénierie de liaison est d'utiliser un budget de puissance et en laissant des marges suffisantes pour satisfaire aux exigences demandées.

1.4.1 Marge et budget de puissance

La méthode de marge et de budget de puissance est performante à cause de sa simplicité. Elle met une limite et une marge confortables pour que le lien satisfasse aux spécifications selon le besoin. Son désavantage est qu'elle ne permet pas de pousser les limites d'un lien qui répond encore aux besoins, tels que le BER. En toute simplicité, il s'agit d'additionner toutes les pertes le long du lien optique et de s'assurer que la puissance émise et amplifiée est sous le seuil des effets non linéaires et que le signal reçu au récepteur est dans sa gamme

dynamique. Des amplificateurs optiques sont ajoutés si nécessaire, avec la restriction de conserver un rapport signal-bruit optique qui respecte le BER minimal.

Dans certains systèmes DWDM, on utilise une unité de compensation de dispersion (DCU) pour compenser la dispersion, ce qui engendre une pénalité proportionnelle à la longueur de la fibre optique de compensation (6 dB typique). Cependant les réseaux de nouvelle génération tentent d'éliminer ces dispositifs grâce à la compensation électronique.

1.5 Les Architectures de réseaux

Dans cette section, nous survolerons différentes topologies de réseaux ainsi que leurs classifications. Nous aborderons aussi la protection et la métrologie des réseaux.

1.5.1 Topologie

De façon générale, un réseau peut prendre cinq différentes familles de topologie. Comme illustré à la Figure 1.2, les différentes topologies sont maillées, en anneau, en bus, en arbre et en étoile. Chacune d'elles a ses avantages et ses désavantages. Le choix de la topologie dépend principalement des coûts et des distances entre les nœuds. La topologie peut aussi influencer la stratégie d'accès et de contrôle d'un réseau. Nous pouvons définir le degré de connectivité d'un nœud comme étant le nombre de liens que celui-ci a avec les autres. Par exemple, le nœud D du réseau maillé I a un degré de connectivité de 4 alors que celui du nœud A n'est que de 2. Un réseau avec liens bidirectionnels peut donc être décrit par sa connectivité, tel que défini par (Baroni et Bayvel, 1997) :

$$\alpha = \frac{2L}{N(N-1)} \quad (1.16)$$

où L et N sont respectivement le nombre de liens et le nombre de nœuds dans le réseau.

Normalement, plus il y a de liens entre chaque nœud, plus grand est le degré de connectivité, plus le réseau est résilient aux défaillances et plus grande est la capacité de transmission. La topologie de l'architecture réseau sans filtre, à cause de la transparence, est un hybride entre une topologie en bus et une topologie en arbre, d'où le terme arbre de fibres optiques utilisé dans ce type de réseau (Archambault et al., 2010).

1.5.2 Classification des réseaux

Les réseaux optiques sont classifiés en trois principales catégories, telles qu'illustré à la Figure 1.3, selon leur dimension et leur fonction (Gumaste et Antony, 2003). Ces catégories sont, selon l'ordre croissant de leur portée, les réseaux d'accès, les réseaux métropolitains et les réseaux de grande distance. Les réseaux d'accès sont à la frontière de l'accès direct à un réseau par les clients. Normalement, la plus grande distance de transmission, pour ce type de réseau, est de l'ordre de 40 à 75 km. Les réseaux métropolitains servent de liens entre les différents réseaux d'accès et les réseaux de grande distance. Traditionnellement, ils ont une topologie en anneaux due à leur évolution à partir de réseaux optiques synchrones. Leur distance de transmission est de l'ordre de 100 à 300 km (Gumaste et Antony, 2003). Les réseaux sans filtre sont conçus pour être utilisés dans les catégories des réseaux métropolitains et des réseaux de grande distance, d'où la réduction des coûts qui rend cette solution très attrayante.

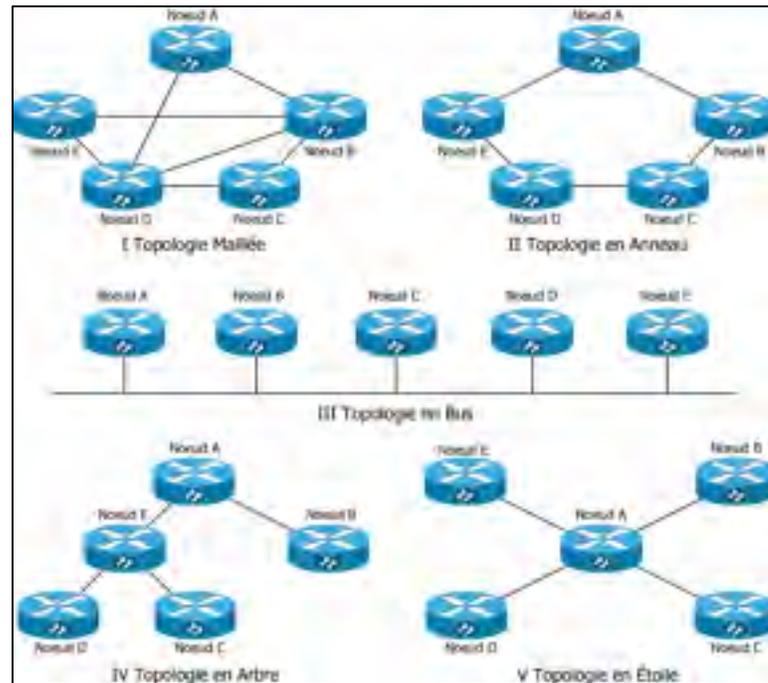


Figure 1.2 Différents types de topologies que peut prendre un réseau

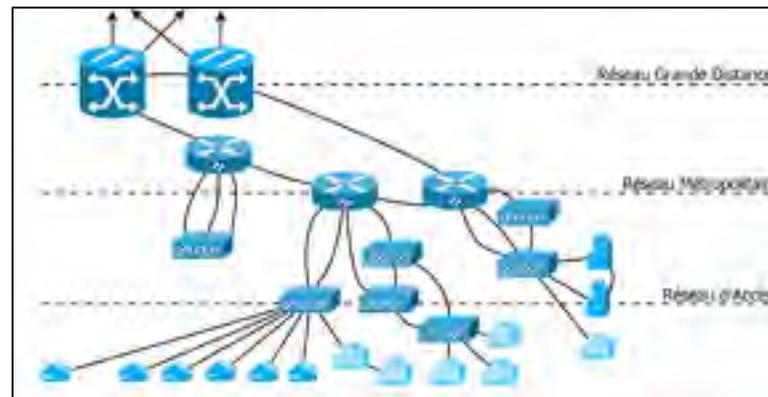


Figure 1.3 Classification des différents réseaux optiques : grande distance, métropolitain et d'accès
Adaptée de Gumaste et Antony (2003)

1.5.3 Protection

La protection dans tout réseau WDM est extrêmement importante. Ceci est dû à la possibilité d'avoir plusieurs canaux dans une seule fibre optique transmettant une énorme quantité de données. Une défaillance peut impliquer qu'une grande quantité d'information ne pourra pas se rendre aux destinataires, ce qui est potentiellement dérangeant pour plusieurs clients. Dépendamment de la nature des données, cette défaillance peut occasionner des pertes financières et, même, le non respect des accords sur les niveaux de service (SLA). Donc, il faut une protection au niveau de la couche optique ainsi qu'un mécanisme de contrôle, qui doit être mis en place pour rediriger le chemin optique de la source vers la destination par un autre chemin (Gumaste et Antony, 2003). Deux types de protection existent dans un réseau WDM : protection de ligne et protection du chemin. La protection de ligne protège complètement la fibre optique ou tous les canaux d'un lien, tandis que la protection du chemin protège un chemin spécifique de la source à la destination. Les facteurs importants de tout mécanisme de protection sont les suivant:

- fiabilité et robustesse;
- efficacité de la largeur de bande;
- temps de récupération (vitesse et déterminisme);
- interopérabilité. (Bernstein, Rajagopalan et Saha, 2004)

Puisque dans un réseau sans filtre, il y a des arbres de fibres optiques dont les nœuds transparents peuvent avoir plusieurs destinations, la protection est plus difficile à cloisonner que dans les réseaux traditionnels WDM. À cause de cette nature:

- il peut exister plus d'un trajet entre deux nœuds, ce qui protège un certain nombre de connexions;
- la protection peut être fournie par des arbres de fibres optiques complémentaires à celui en service. (Archambault et al., 2010)

1.5.4 Métrologie des réseaux

Traditionnellement, la modélisation du trafic sur un réseau se fait selon l'hypothèse que le trafic suit une distribution Poisson ou encore exponentielle. En réalité, elle est de nature auto-similaire avec une dépendance de longue portée, c'est-à-dire une distribution de trafic par rafale (Gumaste et Antony, 2003; Zheng, 2006). Cette notion est importante lors de simulations de la performance, du point de vue de l'augmentation d'échelle, de l'efficacité ainsi que de la résilience à l'implantation du contrôle d'un réseau sans filtre. Le processus de Poisson est quand même un bon point de départ, puisque les résultats peuvent être comparés avec les résultats théoriques qu'on retrouve dans la littérature.

Des métriques de performances qui sont utiles pour l'étude d'un réseau sont le délai moyen de paquets de données, le délai maximal de paquets de données, la longueur moyenne de la file d'attente (queue) et le débit, tout cela en fonction du volume de trafic (Zheng, 2006). D'autres critères de performance utilisés sont (Sivalingam et Subramaniam, 2005) la probabilité de blocage, les longueurs moyennes d'un trajet, les longueurs moyennes des trajets les plus courts, la capacité effective d'utilisation du réseau ainsi que la probabilité de réassigner un trajet.

La probabilité de blocage est un excellent indicateur pour mesurer la performance des stratégies de routage et la tolérance aux défaillances. Elle se définit comme étant le nombre de requêtes bloquées sur le nombre total de requêtes (Sivalingam et Subramaniam, 2005, p. 408) :

$$BP = \frac{\sum_{i,j} \text{Requêtes_bloquées}_{i,j}}{\sum_{i,j} \text{Requêtes_totales}_{i,j}} \quad (1.17)$$

1.6 Le concept de réseau sans filtre

Précédemment, nous avons fait un survol des technologies et des connaissances qui facilitent la compréhension du concept de réseau sans filtre. Selon la définition de (Tremblay et al., 2007), ces réseaux sont une solution réseaux basée sur les récentes technologies de transmission avancées avec des composantes passives (diviseur ou combineur passifs) interconnectant les nœuds. Ce type de réseaux ne requiert ni composante optique reconfigurable ni composante colorée ou en minimise l'usage.

Ce concept est rendu possible grâce aux avancements dans les formats de modulation, la compensation électronique ainsi que les émetteurs-récepteurs accordables. Cela implique qu'il est possible d'ajuster la longueur d'onde émise du laser émetteur et que la réception est faite en accordant le récepteur sur cette longueur d'onde (Archambault et al., 2010). Les réseaux sans filtre sont construits à partir de liens de fibre optique qui connectent tous les nœuds à l'aide de diviseurs et de combineurs optiques passifs devenant une extension du concept d'arbre de lumière (Archambault et al., 2010; Mukherjee, 2006). La Figure 1.4 montre une solution sans filtre pour le réseau allemand à 7 nœuds. On peut y voir comment les coupleurs passifs et les fibres optiques sont connectés ensemble pour offrir une pleine connectivité. Chacune des trois couleurs représente un arbre de fibre optique distinct.

Le problème de la création d'un arbre de fibres optiques a été résolu dans les travaux précédents pour trouver une solution quasi optimale, à l'aide d'algorithmes génétiques qui comprend deux parties:

- établir les connexions de fibres optiques (important pour déterminer la connectivité);
- routage et assignation (RWA) de la longueur d'onde en fonction de la demande du trafic (dépend fortement de la première partie en terme de possibilité). (Archambault et al., 2010)

Pour la recherche de cette solution quasi optimale, trois contraintes sont appliquées pour générer la solution d'un réseau sans filtre:

- aucune boucle fermée dans les interconnexions, avec diviseurs et combineurs entre les nœuds pour éviter les effets laser;
 - la longueur maximale d'un arbre de fibres optiques entre toutes les combinaisons racines et feuilles est limitée à 1500 km;
 - les solutions qui minimisent le nombre de longueurs d'onde sont favorisées.
- (Archambault et al., 2010)

Ceci résume la conception d'une solution sans filtre au niveau de l'architecture et le problème de conception est considéré comme étant résolu dans ce mémoire, même si la solution quasi optimale n'est pas nécessairement la meilleure possible. Des travaux sont toujours en cours pour l'amélioration de la plateforme de conception et de simulation ainsi que l'augmentation du niveau de protection de réseaux optiques sans filtre.

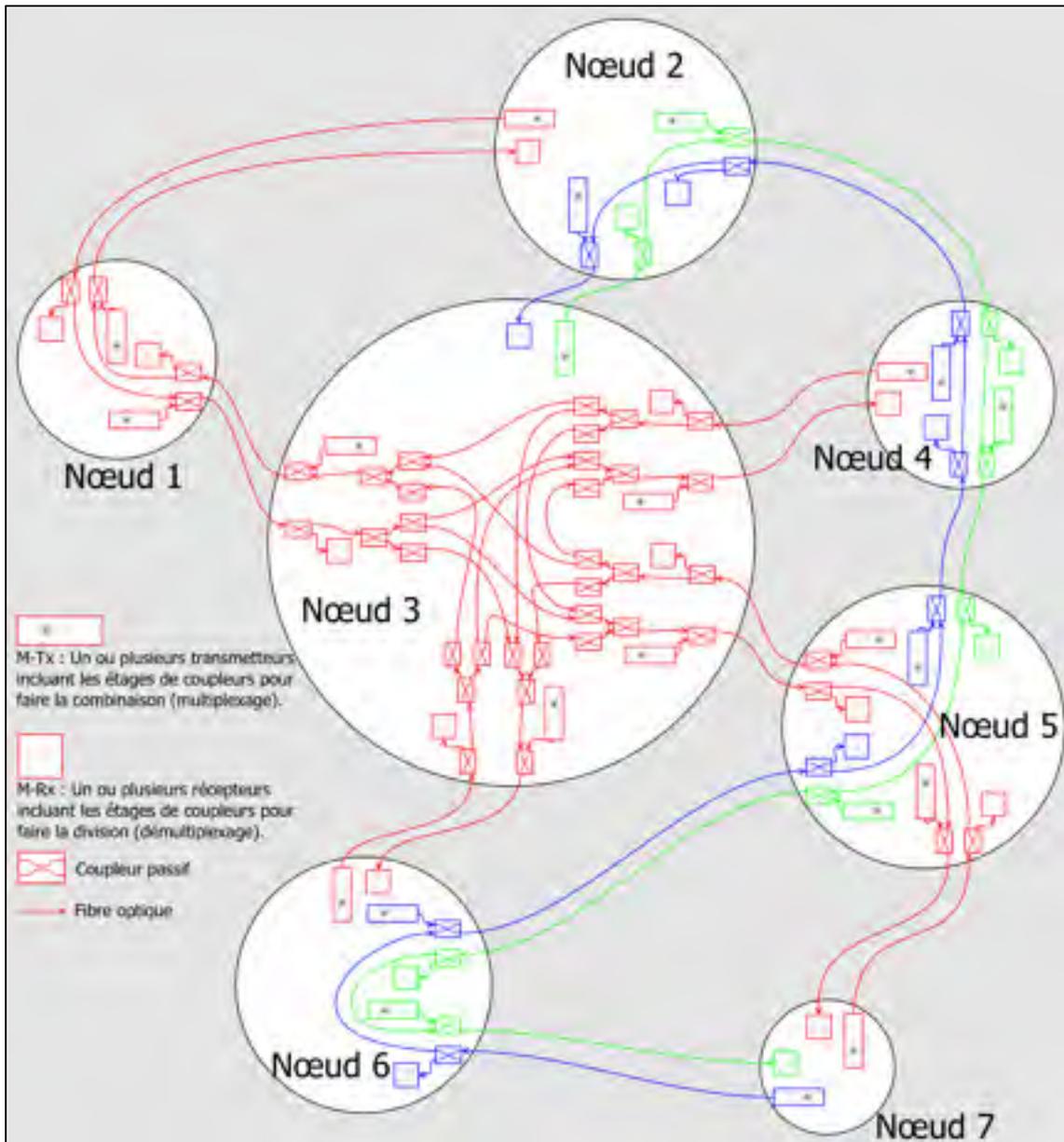


Figure 1.4 Solution sans filtre à trois arbres de fibres optiques du réseau allemand à 7 nœuds démontrant la pleine connectivité faite à partir de coupleurs passifs et de fibres optiques. Chacune des couleurs représente un arbre de fibres optiques distinct

CHAPITRE 2

LE SIMULATEUR DE RÉSEAUX SANS FILTRE

2.1 Plateforme de modélisation

Dans ce chapitre nous définirons la plateforme de simulation des réseaux sans filtre. Le choix d'utiliser des logiciels libres a été priorisé, sauf dans le cas où aucune alternative équivalente n'était disponible.

2.1.1 OMNeT++

Pour atteindre notre objectif, nous avons utilisé la plateforme OMNeT++. OMNeT++ est une librairie de simulation modulaire, implantée en C++, de code *Open Source* et gratuite pour l'utilisation académique. Elle a été développée afin de simuler des réseaux de tout type, à différents niveaux d'abstraction, du modèle OSI. C'est un environnement de simulation à événement discret, qui est idéal pour la simulation de systèmes de technologie de l'information, de réseaux de files d'attente et d'architectures matérielles (OMNeT++). Cette plateforme est dotée d'une puissante interface d'analyse et de collecte de statistiques. Elle facilite l'analyse de paramètres réseau tels que les latences, le blocage, ainsi que des simulations de trafic de type Poisson ou, encore, de trafic de distribution arbitraire, etc. Dans ce mémoire, nous faisons les simulations en utilisant une distribution de trafic de type Poisson. OMNeT++ offre aussi la possibilité d'utiliser la librairie openMPI pour transformer la simulation en exécution parallèle. Cette direction de développement futur est projetée et sera nécessaire lors de simulations de grands réseaux (grande connectivité et grand nombre de nœuds). OMNeT++ est une excellente alternative à OPNET.

2.1.2 Le Framework INET

Une autre plateforme qui pourrait être utilisée pour modéliser la communication entre les utilisateurs et l'interface du réseau fédérateur est INET. INET est un « Framework » bâti sur OMNeT++, qui contient des modules pour faire la simulation de protocoles comme, UDP, TCP, Ethernet, MPLS, etc. À présent, le simulateur n'utilise pas INET, les routeurs utilisent une dérivation et une adaptation du code de (Binh et al., 2003; Cieutat et Binh, 2003) (voir section 2.1.4).

2.1.3 Le simulateur PhoenixSim

PhoenixSim (Photonic and Electronic Network Integration and Execution Simulator) est en développement par le « Lightwave Research Laboratory » de l'Université Columbia dans la ville de New York. PhoenixSim sert à simuler la couche physique des réseaux optiques sur silice, dans le but de modéliser la communication entre les processeurs et la mémoire sur composante de silice ainsi que le plan de contrôle de cette communication (Columbia University Lightwave Research Laboratory). Ce simulateur est, lui aussi, développé sur l'environnement OMNeT++ et a été un bon point de départ de notre simulateur.

2.1.4 Les routeurs GMPLS

Les routeurs GMPLS sont une dérivation et une adaptation du code source de chercheurs de l'Université Monarch, en Australie (Binh et al., 2003; Cieutat et Binh, 2003). Le concept a été adapté pour les réseaux sans filtre alors que, dans leur simulateur, c'était pour des réseaux traditionnels avec ROADM. Les routeurs utilisent les protocoles RSVP-TE, GMPLS et un prototype semblable à UDP. Ces protocoles sont transmis dans la couche physique. Cela est facilement réalisable grâce à l'abstraction entre les différents niveaux de couches réalisée par encapsulation, ce qu'OMNeT++ permet. Cette abstraction rendra aussi possible l'utilisation d'OTN, comme c'est le cas dans les systèmes de Ciena.

2.1.5 Le simulateur réseau sans filtre (FiNetSim)

Le simulateur sans filtre est construit à l'aide de l'environnement OMNeT++, incorporant des éléments du routeur GMPLS de Monarch pour le protocole du plan de contrôle ainsi que l'extension de PhoenixSim, dont la méthodologie d'implantation, afin de modéliser la couche physique optique des réseaux sans filtre. Ceci est réalisé grâce à la modification et à l'extension de leur code source. Les modules développés dans PhoenixSim ne s'appliquent pas directement au réseau sans filtre à cause de leurs différences (laser Fabry Péro, résonateur circulaire, aucune amplification, etc.), mais la même philosophie de modélisation s'applique.

Une étape importante était de transformer les solutions de réseaux générées par la plateforme de conception des réseaux sans filtre dans le langage d'OMNeT nommé *Network Description Language* (NED). Il est maintenant possible de prendre n'importe quelle solution générée par cette plateforme de conception et d'en faire des simulations OMNeT++, grâce à une collection d'outils, développés, dans le logiciel Matlab pour faire la conversion. Ceci permettra d'intégrer le simulateur dans un outil tout-en-un. Avec quelques modifications, il est possible d'automatiser la génération de réseaux dans VPI, qui utilise le langage de programmation TCL, afin de valider le simulateur. Dans l'annexe, se trouve un exemple NED d'un petit réseau hypothétique de quatre nœuds, développé pour tester rapidement le simulateur lors du développement. Il est possible que des changements dans l'interconnexion entre les modules (surtout au niveau des coupleurs et de l'ajout de bloqueurs) soient nécessaires, car la spécification des réseaux sans filtre n'a pas été complètement finalisée à ce jour. Ce mémoire tente d'avancer le développement des spécifications, mais il est possible d'adapter très facilement le modèle à tout type d'architecture, tel que semi sans filtre, qui offre une meilleure utilisation des longueurs d'onde (Chen et al., 2011). Il est aussi possible de séparer les calculs de la couche physique des couches supérieures à l'aide de la librairie openMPI afin de les répartir entre plusieurs processeurs et sur différents ordinateurs afin d'accélérer les simulations (*Beowulf Clusters*).

2.2 Représentation et nomenclature de l'architecture

Une nomenclature permettant la représentation des réseaux sans filtre a été créée afin de faciliter la génération de la topologie. Elle suit étroitement les travaux précédents des membres de l'équipe en ce qui trait à la disposition des étages de coupleurs avant récepteurs et après transmetteurs. Elle suit aussi la disposition des coupleurs lors de la division et de la combinaison avec d'autres branches des arbres de fibres optiques. À la Figure 2.1, on retrouve une solution sans filtre du réseau allemand à 17 nœuds, comme représentée graphiquement dans OMNeT++. Chacune des couleurs représente un « arbre » de fibres optiques différent. Il est à noter que les arbres de fibres optiques sont en réalité plus généralement représentables par un graphe. Ceci est dû à la combinaison possible de plusieurs racines d'origine. Néanmoins, dans ce mémoire, les graphes seront référés comme étant des arbres de fibres optiques sachant qu'un graphe est une représentation formelle précise.



Figure 2.1 Représentation d'une solution sans filtre du réseau allemand à 17 nœuds dans le simulateur OMNeT++

L'interconnexion des arbres de fibres optiques se fait à l'intérieur des nœuds, comme c'est le cas dans les réseaux DWDM traditionnels. Chaque nœud est une collection de contacts qui ont une correspondance directe avec la notion de port d'entrée et de port de sortie. Ils sont reliés entre eux par des coupleurs optiques passifs et selon la description de la topologie générée. L'utilisation de coupleur en étoile est aussi une alternative sans perte de généralité. À la Figure 2.2, nous avons la représentation visuelle par le simulateur OMNeT++ de l'interconnexion entre les contacts dans les nœuds 6 (gauche) et 8 (droite) du réseau allemand à 17 nœuds. La couleur de chacun des liens correspond aux arbres de fibres optiques. Les segments pleins signifient un port de sortie du nœud alors que les segments courts pointillés signifient un port d'entrée dans le nœud. Finalement, les segments longs pointillés correspondent aux interconnexions entre les contacts internes au nœud.



Figure 2.2 Représentation par le simulateur OMNeT++ de la connectivité interne dans les nœuds 6 (gauche) et 8 (droite) dans la solution du réseau allemand à 17 nœuds

Chaque contact comprend des composantes photoniques telles que les coupleurs optiques passifs, des amplificateurs EDFA, des transmetteurs ou des récepteurs, selon leurs types. Le Tableau 2.1 montre la formation des divers types de contacts et une nomenclature correspondante, dans la dernière colonne. Quatre types de contacts sont possibles, le premier dénotés comme étant de type 1 n'est composé que de récepteurs seulement avec une seule

entrée, sans aucune sortie. C'est un port de terminaison sans aucun trafic transitaire dans le domaine optique. Le type 2 n'est composé que de transmetteurs avec une sortie et sans aucune entrée. C'est un port où tout le trafic optique débute, c'est-à-dire, une racine dans l'arbre de fibres optiques. Le type 3 est composé de récepteurs avec un ou plusieurs ports de sortie pour les connexions inter contact du nœud, permettant le trafic transitaire optique, et un port d'entrée provenant de l'extérieur du nœud. Finalement, le contact de type 4 est composé de transmetteurs avec un ou plusieurs ports d'entrée pour l'interconnexion entre les contacts du nœud, permettant au trafic de transiter à un port de sortie vers l'extérieur du nœud.

Tableau 2.1 Les quatre types de contact qui peuvent exister dans l'architecture des réseaux sans filtre avec respectivement le nombre de récepteurs, de transmetteurs, d'entrées, de sorties et, pour chacun, l'appellation du contact

Type de contact (K)	Nombre de récepteurs (R)	Nombre de transmetteurs (T)	Nombre d'entrées (I)	Nombre de sorties (U)	Appellation du contact
1	1 ou plus (n)	Aucun	1	0	K1RnI1T0U0
2	Aucun	1 ou plus (n)	0	1	K2R0I0TnU1
3	1 ou plus (n)	Aucun	1	1 ou plus (m)	K3RnI1T0Um
4	Aucun	1 ou plus (n)	1 ou plus (m)	1	K4R0ImTnU1

Les contacts avec récepteurs (types 1 et 3) ont un récepteur additionnel (Rx Ctl). Ce dernier est toujours présent et attribué au canal de contrôle ("out-band Optical Supervisory Channel" (OSC)). Il est aussi impliqué dans la découverte de la topologie (canal de tonalité). Ce mémoire utilise la longueur d'onde de 1529.16 nm pour la communication du plan de contrôle et de 1529.94 nm pour le canal de tonalité. Puisque ces récepteurs ne sont pas accordables, un filtre doit être placé à l'avant pour laisser passer ces deux canaux ayant un taux binaire de 155 Mb/s et pour couper tous les autres canaux DWDM. Un amplificateur est placé devant les étages de coupleurs servant de préamplificateurs pour compenser la perte de ceux-ci. Dans le cas d'un contact de type 3, qui permet le trafic transitaire optique, un filtre doit être placé après le coupleur d'extraction, bloquant le canal de contrôle, mais laissant passer tous les autres, incluant celui de la découverte de la topologie. La longueur d'onde

n'est pas critique, mais il faut que le canal qui effectue la découverte soit amplifié par les EDFA pour que la communication soit établie. Le canal de contrôle est régénéré dans le domaine électrique à tous les sites d'amplification et à tous les nœuds.

Une situation analogue existe pour les contacts avec transmetteurs (type 2 et 4). Un transmetteur additionnel (Tx Ctl) est destiné au canal de contrôle et au canal de tonalité, permettant la découverte de la topologie. Dans ce cas-ci, ce sont des transmetteurs accordables dont la plage d'accordabilité peut être restreinte, mais il est important que la longueur d'onde soit stable et que l'étalement spectral soit faible pour éviter que ce canal n'empiète sur les autres canaux. Le format de modulation utilisé est le RZ et le taux binaire est de 155 Mb/s, comme mentionné précédemment. Puisque le canal de tonalité n'est pas compensé dans le domaine électrique (afin de réduire les coûts), la distance maximale est limitée à environ 3300 km (avec une largeur spectrale de 0.04 nm) à cause de la dispersion chromatique. La portée du canal de tonalité peut être augmentée si nécessaire avec la compensation de dispersion électronique, mais il faut que cela soit pour tous les transmetteurs et tous les récepteurs de contrôle dont la longueur maximale de l'arbre dépasse cette distance.

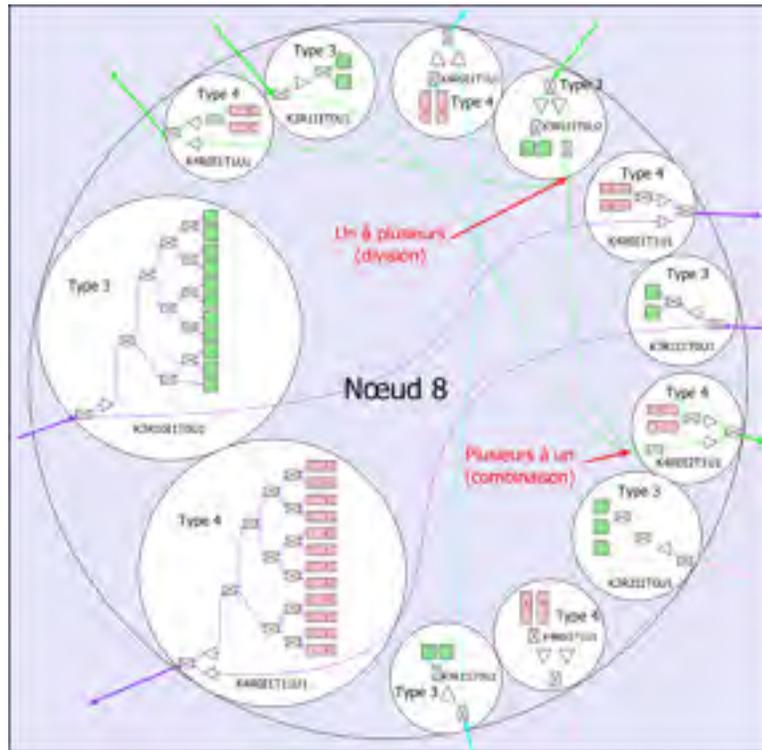


Figure 2.3 Illustration de la pleine connectivité du nœud 8 du réseau allemand à 17 nœuds avec la nomenclature correspondante selon le contact. Les transmetteurs sont rouges et les récepteurs sont verts

Le schéma de la Figure 2.3 montre la connectivité complète de la couche physique du nœud 8 dans le réseau allemand à 17 nœuds, tant l'interconnexion entre les contacts que la connexion dans les contacts mêmes selon leur type. C'est le même nœud que celui de la droite dans la Figure 2.2.

La plateforme de conception développée par d'anciens membres de l'équipe génère la connectivité d'un réseau à l'aide d'algorithmes génétiques permettant d'obtenir une pleine connectivité transparente entre chaque paire de nœuds. Cette dernière est représentée sous forme de matrices avec l'assignation de longueurs d'onde en terme de valeur unique selon la matrice de trafic, pour chaque demande. La plateforme de conception ne génère pas le placement des amplificateurs ni la disposition des coupleurs passifs donc ne place aucune

composante. Nous avons implémenté une collection de routines Matlab afin de créer la connexion des composantes, définie selon des règles d'ingénierie précises, à partir des matrices correspondant à la connectique des contacts et des liens de la plateforme de conception.

À titre d'exemple, la Figure 2.4 montre un contact de type 1 (gauche) et l'autre de type 2 (droite), tel que visualisé dans OMNeT++. Quant à la Figure 2.5, elle montre un contact de type 3 (gauche) et de type 4 (droite). Les nœuds sont reliés entre eux à partir des contacts provenant d'un nœud source jusqu'à un contact d'un nœud destination. Une règle simple est établie lorsque le lien dépasse 90 km (paramètre ajustable), on ajoute des amplificateurs à segments équidistants pour que chaque segment ne dépasse pas les 90 km. Cette valeur provient du fait que pour maximiser la distance d'un OSNR acceptable et pour minimiser les coûts, une distance entre 70 km à 90 km d'espacement satisfait cette contrainte, selon l'approximation de l'équation (1.15). Le placement exact dépend fortement du terrain et les distances choisies servent seulement à faciliter la comparaison des topologies. La Figure 2.6 montre le lien entre les nœuds 6 et 11, ayant une distance totalisant 353 km. Donc, pour avoir des segments équidistants de moins de 90 km et un minimum de segments et d'amplificateurs, nous avons un lien comprenant cinq segments de 71 km avec cinq amplificateurs. Le dernier amplificateur appartient à un nœud afin de compenser l'atténuation de la fibre optique avant que l'ensemble des canaux soient dupliqué et que la puissance soit divisée vers les étages de coupleurs des détecteurs et vers d'autres directions s'il y a eu (type 3). Un préamplificateur est placé avant les étages de coupleurs pour compenser l'atténuation (3.2 dB par étage), ramenant le signal au-dessus de la sensibilité du récepteur. Aussi, lorsque le signal est divisé vers d'autres arbres de fibres optiques, un autre amplificateur est ajouté afin de compenser ces pertes et de faciliter l'égalisation des canaux qui sont ajoutés par les transmetteurs des contacts correspondants (type 4). Une situation correspondante existe à la combinaison d'arbres de fibres optiques, une amplification est effectuée aussi après les étages de combinaison.

Les coupleurs peuvent être classifiés en quatre catégories, selon leur emplacement dans l'architecture. Ils sont tous identiques dans les simulations. Une certaine optimisation est possible si le nombre de coupleurs dans l'étage final n'est pas une puissance de deux. Nous classifions ainsi les coupleurs:

- coupleurs de détecteurs (Detector) — coupleurs dans les étages qui divisent le signal avant les récepteurs;
- coupleurs d'extraction (Drop) — coupleurs qui divisent le signal vers les étages de coupleurs de détecteurs et ceux qui continuent;
- coupleurs d'addition (FanIn) — coupleurs dans les étages qui combinent le signal provenant d'autres branches à une branche;
- coupleurs de division (FanOut) — coupleurs dans les étages qui divisent le signal d'une branche pour aller vers d'autres chemins;
- coupleurs de transmetteurs (Transmitter) — coupleurs dans les étages qui combinent les signaux provenant des transmetteurs.

Les amplificateurs sont aussi classifiés en cinq catégories selon leur emplacement dans l'architecture. Par contre, même si leur but est d'amplifier, ils peuvent jouer un rôle différent et avoir une différente composition interne. Par exemple, certains peuvent inclure des filtres à courbe spectrale de gain dynamique (DGFF) ou fixe, avoir une préamplification suivie d'un suramplificateur, etc. Il est à noter que les amplificateurs avec filtres dynamiques sont beaucoup plus coûteux que les fixes. Les catégories d'amplificateurs dans cette architecture sont :

- amplificateurs de ligne (LineAmp) — Amplificateurs qui compensent la perte de la fibre optique et remontent la puissance à celle d'injection;
- post-amplificateurs d'addition (PostAmp FanIn) — Amplificateurs à la suite des étages de coupleurs d'addition pour compenser leurs pertes et égaliser les signaux provenant des différentes branches;
- post-amplificateurs de transmetteurs (PostAmp Transmitter) — Amplificateurs pour compenser les pertes dans les étages de coupleurs de transmetteurs et remonter la

puissance à celle d'injection suivant le coupleur qui combine les autres branches, s'il y a lieu (type 4). Dans ce cas-ci, l'égalisation de la puissance peut se faire directement en faisant varier la puissance de sortie des transmetteurs;

- préamplificateurs de division (PreAmp FanOut) — Amplificateurs précédant les étages de coupleurs de division afin de précompenser leurs pertes et d'égaliser les signaux allant vers différentes branches;
- préamplificateurs de détecteurs (PreAmp Detector) — Amplificateurs précédant les étages de coupleurs de détecteurs afin de précompenser leurs pertes et remonter le signal au-dessus du seuil de sensibilité des récepteurs et en tenant compte de la marge de puissance.

Tous les liens et les nœuds obéissent à ces règles d'ingénierie, créant la connectique des réseaux sans filtre dans le simulateur.

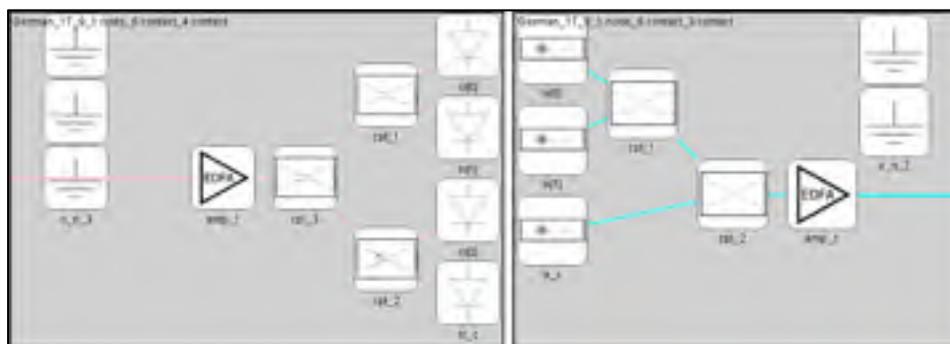


Figure 2.4 Contact de type 1 (gauche) et de type 2 (droite) correspondant, respectivement, aux contacts 32 et 31 du nœud 6 du réseau allemand à 17 nœuds

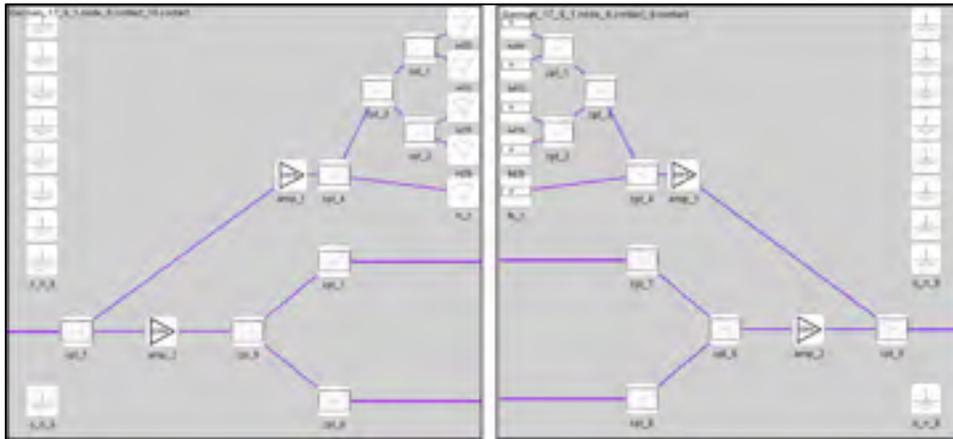


Figure 2.5 Contact de type 3 (gauche) et de type 4 (droite) correspondant, respectivement, aux contacts 38 et 37 du nœud 6 du réseau allemand à 17 nœuds

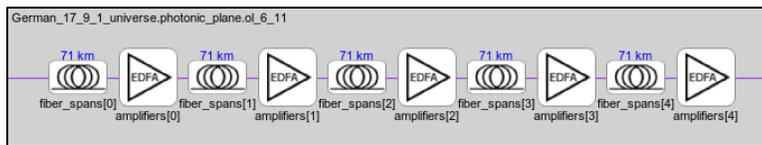


Figure 2.6 Lien optique totalisant 353 km partant du nœud 6 jusqu'au nœud 11, démontrant les cinq segments amplifiés de 71 km

Les transmetteurs et les récepteurs sont, eux aussi, une collection d'éléments transformant les communications entre les domaines électrique et optique, et vice versa, à l'aide d'interfaces réseau. La Figure 2.7 montre un transmetteur (gauche) et un récepteur (droite).

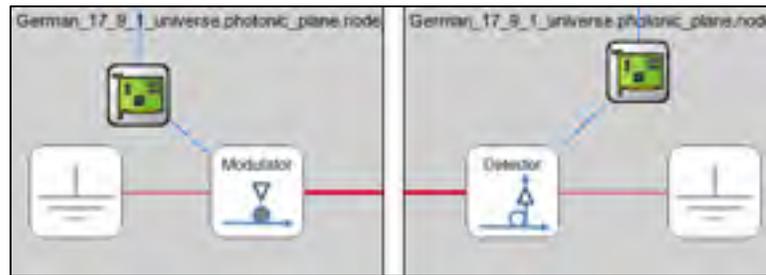


Figure 2.7 Composition des modules transmetteurs (gauche) et récepteurs (droite) faisant partie de la modélisation de la couche physique. Les cartes matérielles représentent l'interface réseau (NIF) entre le contrôleur du nœud et les émetteurs-récepteurs

Finalement, dans un nœud, tous les transmetteurs et tous les récepteurs sont en communication avec le contrôleur du nœud dans le domaine électrique, grâce aux interfaces réseau, pour diriger le trafic et les commandes. Ces interfaces rendent possible, notamment, d'ajuster les longueurs d'onde pour la transmission et la réception, d'ajuster aussi la puissance du laser et de transmettre de l'information inter nœud grâce à la couche physique optique. La Figure 2.8 montre les connexions du contrôleur de chaque nœud avec chacune de ses interfaces réseau ainsi que la connectivité logique du plan de contrôle (de chaque contrôleur) entre les nœuds, pour un petit réseau hypothétique à quatre nœuds, dont la description NED se trouve dans l'annexe. Tel que mentionné plus haut, la connectivité du plan de contrôle est semblable au canal de découverte de la topologie (tonalité). Quant au canal contrôle, il est régénéré à tous les amplificateurs et terminés à tous les nœuds.

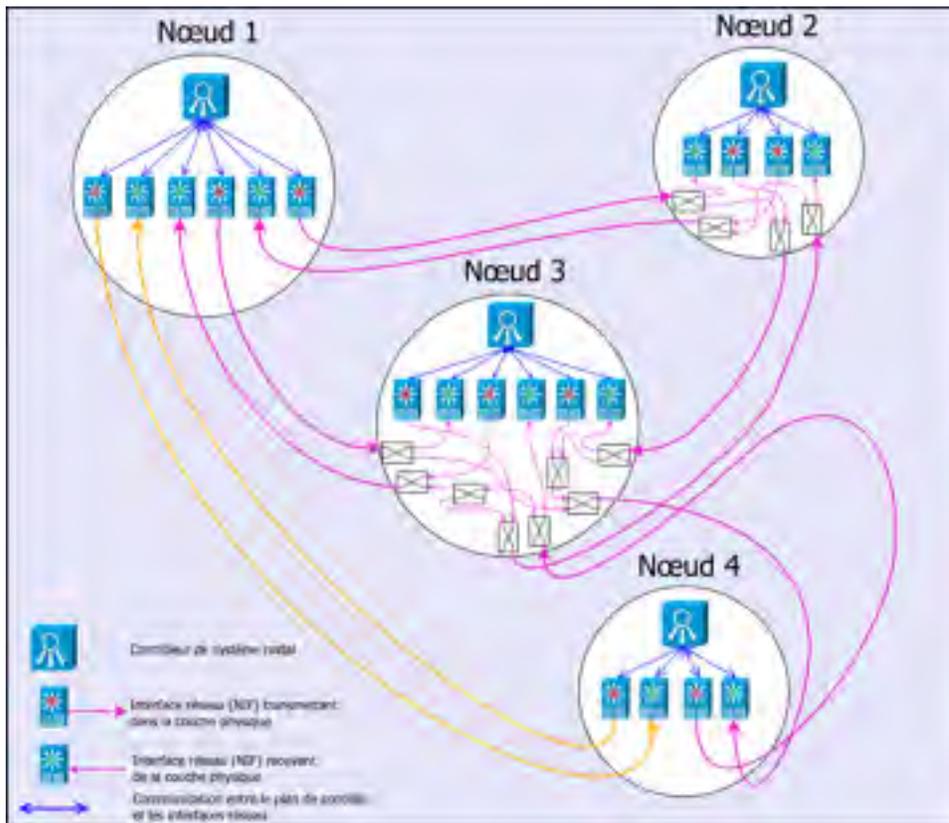


Figure 2.8 Relation entre le contrôleur établi à chaque nœud et interfaces réseau connectées directement à la couche physique

CHAPITRE 3

MODÉLISATION DE LA COUCHE PHYSIQUE

La modélisation de la couche physique est une composante importante dans le développement du simulateur pour atteindre l'objectif d'un plan de contrôle au courant des limitations de la couche physique. Afin de modéliser la couche physique, nous supposons que la communication optique est unidirectionnelle (aucune propagation arrière), ce qui équivaut à des isolateurs optiques parfaits avant et après chaque composante. Dans le but de déterminer la qualité de la transmission à la réception, le taux d'erreur sur les bits (BER) est utilisé comme unité de mesure de la performance. Pour ce faire et puisque la dégradation du signal est due majoritairement au bruit des amplificateurs à l'erbium (ASE), un modèle du rapport du signal sur le bruit, tel qu'expliqué dans la prochaine section, est utilisé.

3.1 Modèle signal sur bruit

Un modèle rapport signal sur bruit est utilisé pour modéliser la qualité de transmission de la communication. Les paramètres importants pour modéliser et définir la courbe spectrale des signaux et du bruit se propageant dans la couche physique sont :

- nombre de canaux;
- espacement entre les canaux;
- canal minimal;
- canal maximal.

Il est à noter que la simplicité d'utilisation de la grille ITU DWDM (ITU, 2002) permet de représenter des espacements égaux entre les canaux. Cette contrainte peut être détendue car modifier la structure vectorielle (structure de données dans le simulateur) permettrait d'adapter cette structure à une stratégie dite flexible, appliquée aux réseaux sans filtre. De plus, une granularité plus fine représentant la courbe spectrale de bruit peut être utilisée si nécessaire, pour une plus grande précision des modèles et de la simulation. Avec un

espacement plus grand entre les canaux, nous supposons que la largeur spectrale du laser ainsi que son étalement spectral sont beaucoup plus petits que l'espacement entre les canaux dans le modèle. De plus, rien n'empêche d'utiliser une grille WDM orthogonale pour réduire la diaphonie (principalement, mélange à quatre ondes), ce qui est projeté comme incontournable dans les réseaux sans couleur de prochaine génération, à forte densité de canaux, utilisant une grille à espacement régulier. La grille ITU est générée à partir de la fréquence de référence de 193.1 THz, avec la constante de la vitesse de la lumière de $c = 2.99792458 \times 10^8$ m/s servant de facteur de conversion en longueur d'onde. Les paramètres tels que l'espacement entre les canaux, le nombre de canaux, le premier canal et le dernier canal sont montrés dans le Tableau 3.1. Notons que la grille ITU, dans cette table, inclut la bande C et L, mais les réseaux sans filtre seront dans la bande C (du moins à leurs débuts), car les amplificateurs EDFA, dans cette bande, sont matures. Toutes les simulations dans ce mémoire utilisent la bande C de 88 canaux, avec 50 GHz d'espacement et avec 1530.14 nm comme premier canal.

Tableau 3.1 Paramètres spectraux selon l'espacement des canaux dans la grille ITU

Espacement (GHz)	Nombre de canaux	Premier canal (nm)	Dernier canal (nm)
12.5	916	1530.04	1624.89
25	458	1530.14	1624.89
50	229	1530.33	1624.89
100	115	1530.33	1624.89

Ainsi, chaque longueur d'onde et avec ses paramètres physiques importants associés peut se propager dans la couche physique. Un vecteur, qui représente le bruit du signal à chacune des tranches de longueur d'onde, est modifiable par les composantes dans lesquelles le bruit du signal se propage. À titre d'exemple, l'ajout de deux différentes courbes spectrales de bruit (ASE), qui proviennent de deux branches différentes d'un coupleur optique et qui sont dues aux amplificateurs EDFAs, permet de modéliser l'effet entonnoir de bruit sur la qualité de la transmission. La Figure 3.1 montre schématiquement la représentation du signal sur bruit sur

une grille hypothétique de 7 canaux avec 800 GHz d'espacement. Les paramètres physiques importants sont:

- la longueur d'onde du canal;
- la puissance du canal;
- le spectre de bruit;
- la dispersion accumulée;
- le nombre d'amplificateurs traversés, utilisé pour le calcul de l'ajout ou l'enlèvement d'un canal (pour la dynamique).

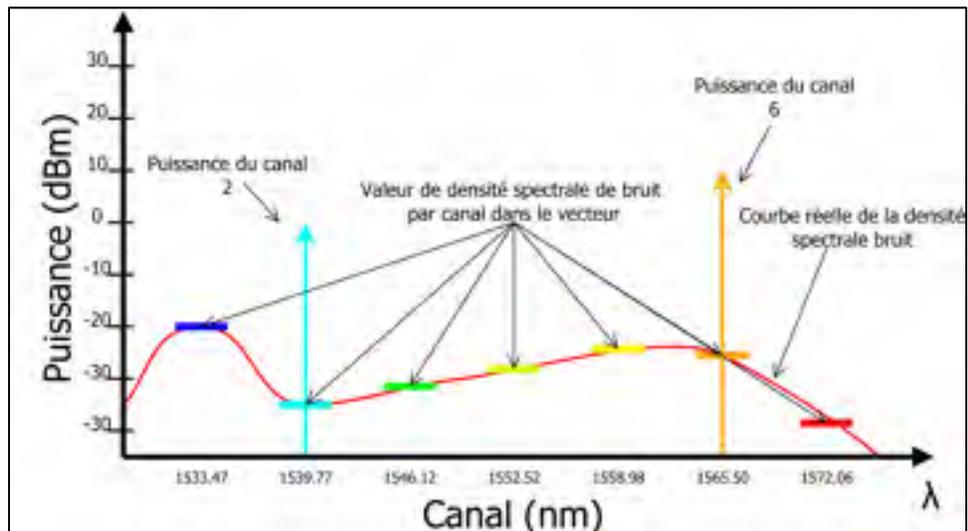


Figure 3.1 Représentation du signal et du bruit pour le modèle signal sur bruit correspondant à une représentation hypothétique de 7 canaux sur une grille avec 800 GHz d'espacement

3.2 Composantes

La modélisation des composantes est décrite dans les sous-sections suivantes, du transmetteur au récepteur.

3.2.1 Transmetteur

Les paramètres du transmetteur déterminent les conditions initiales du spectre optique au tout début de la transmission. Le Tableau 3.2 montre les paramètres d'un transmetteur accordable typique, qui sont représentés ainsi que leur utilisation dans le simulateur. Ces paramètres ont une influence sur les latences ainsi que sur la qualité de la transmission finale.

Tableau 3.2 Exemple des paramètres de transmetteurs avec la correspondance dans le simulateur

Paramètres	Symbole	Valeur	Paramètres correspondants dans le simulateur	Utilisation dans le simulateur	Valeur dans le simulateur	Unité dans le simulateur
Puissance laser (dBm)	P_{Tx}	-6.5	LaserPower	Puissance moyenne du signal modulé et modifié par l'atténuation et l'amplification. Ajustable par le contrôleur.	-6.5 Ajustable	dBm
Longueur d'onde (nm)	λ	1542.94	Wavelength	Longueur d'onde du laser sur la grille ITU. Ajustable par le contrôleur.	1542.94×10^{-9} Ajustable	m
Largeur spectrale (nm)	σ_{λ}	0.04	SpectralWidth	Calcul des latences dues à la compensation électronique à partir du vecteur Dispersion_Coefficient dépendant de λ .	0.4×10^{-9}	m
Rapport d'extinction (dB)	r	30	ExtinctionRatio	Calcul de l'OSNR final. Non utilisé à cause de la paramétrisation des récepteurs des amplificateurs.	1000	—
Temps d'accord (ms)	τ_{tune}	10	TuningTime	Temps moyen pour accorder le laser lorsque stabilisé. Suit une distribution normale dans les simulations.	10×10^{-3}	S.
Temps de stabilisation (s)	t_{warmup}	60	WarmupTime	Le temps nécessaire pour stabiliser un laser, lorsqu'il initialement allumé.	60	s
Type de modulation	--	DQPSK RZ	ModulationType	Option de calcul final du SNR qui dépend du type de modulation.	"DQPSK" "RZ"	
Rapidité de modulation (Gb/s)	B	46 0.155	ModulationRate	Option de calcul final du SNR qui dépend de la vitesse de modulation.	46×10^9 155×10^6	s ⁻¹
Gigue (ps)	Δt_{jitter}	12	Jitter	Calcul final du SNR qui cause la fermeture de l'œil temporel. Non utilisé en ce moment.	12×10^{-12}	s
Délai de modulation (μs)	t_{mod}	0.3	Latency_Modulator	Délai ajouté lors de la modulation à l'envoi d'un message optique du plan de contrôle.	0.3×10^{-6}	s

Puisque dans l'architecture, chaque banque de transmetteurs est jumelée à un transmetteur du canal contrôle, le signal subit l'atténuation d'au moins un coupleur et sera ensuite amplifié avant la sortie du nœud. Ceci justifie une puissance initiale de -6.5 dBm, qui sera éventuellement ajustée à -9.5 dBm à l'injection de la fibre optique et en dessous du seuil d'effets non linéaire (voir section 3.2.3.3).

3.2.2 Coupleur optique

Les coupleurs sont tout simplement modélisés en faisant une copie du message photonique (voir Section 4.2), dont l'original et la copie sont envoyés à chacune des branches des sorties, avec atténuation définie de 3.5 dB, qui est un paramètre modifiable. La dépendance du taux de couplage dans chacune des branches en fonction de la longueur d'onde peut être ajoutée dans le futur, mais jugée non nécessaire pour cette étude. Comme il est mentionné à la section 2.2, un coupleur idéal 50-50 donne une atténuation de 3.2 dB, mais la valeur de 3.5 dB est utilisée pour prendre en compte, approximativement, les pertes dues à la connectique.

La puissance des signaux de chaque branche d'entrée est combinée en un signal et atténuée, puis envoyée à chaque branche de sortie. Aucune collision de longueurs d'onde ne doit se produire et, advenant le cas, le simulateur s'arrêtera et générera une erreur. Le vecteur de puissance du signal devient donc:

$$\overline{P}_{S_{o_1, o_2}}(\lambda) = \left(\overline{P}_{S_{i_1}}(\lambda) + \overline{P}_{S_{i_2}}(\lambda) \right) - \alpha_{dB} \quad [dBm] \quad (3.1)$$

où $P_{S_{o_1, o_2}}$ est la puissance du signal à la sortie de la branche 1 et de la branche 2 du coupleur, $P_{S_{i_1}}$ est la puissance du signal à l'entrée de la branche 1, $P_{S_{i_2}}$ est la puissance du signal à l'entrée de la branche 2 et α_{dB} est l'atténuation résultant de la division (coupleur 50-50).

Les puissances de bruit qui sont atténuées et qui subissent un effet d'entonnoir, sont aussi prises en compte. Elles sont calculées à l'aide de l'équation suivante, qui tient compte de la nature statistique gaussienne du bruit ASE et qui donne le résultat à chaque branche par :

$$\overline{Pn}_{o_1, o_2}(\lambda) = 10 \log_{10} \left(10^{\frac{(\overline{Pn}_{i_1}(\lambda) - \alpha_{dB})}{10}} + 10^{\frac{(\overline{Pn}_{i_2}(\lambda) - \alpha_{dB})}{10}} \right) \quad [dBm] \quad (3.2)$$

où Pn_{o_1, o_2} est la puissance du signal à la sortie de la branche 1 et de la branche 2 du coupleur, Pn_{i_1} est la puissance du signal à l'entrée de la branche 1, Pn_{i_2} est la puissance du signal à l'entrée de la branche 2 et α_{dB} est l'atténuation résultante de la division.

3.2.3 Fibre optique

Afin de modéliser la fibre optique, les paramètres de la fibre optique monomode SMF-28 de Corning sont utilisés et sont exposés dans le Tableau 3.3. Ces paramètres sont des propriétés qui influencent les limitations dues à la dispersion chromatique, à l'atténuation et aux effets non linéaires.

3.2.3.1 Dispersion chromatique

Dans le cas d'une fibre optique monomode, la linéarisation de l'équation de Sellmeier nous donne une approximation de la dispersion chromatique, c'est-à-dire le paramètre D de cette fibre optique (Hui et O'Sullivan, 2009) :

$$D(\lambda) \approx \frac{S_0}{4} \left[\lambda - \frac{\lambda_0^4}{\lambda^3} \right] \quad (3.3)$$

où λ_0 est la longueur d'onde de dispersion nulle, S_0 est la pente de dispersion à la longueur d'onde de dispersion nulle et λ est la longueur d'onde pour laquelle la valeur de la dispersion D est recherchée. Les réseaux sans filtre sont conçus de façon à ce que la compensation de la dispersion chromatique ainsi que la dispersion des modes de polarisation (PMD) soient faites dans le domaine électrique. Le simulateur tient compte de cette valeur dans le but de calculer les latences résultant de la compensation électronique à l'aide du traitement numérique du signal (DSP). Comme il est démontré dans l'article de (Kametani et al., 2011), l'ordre de magnitude des latences due à la correction d'erreurs sans circuit de retour (FEC) et

à la compensation électronique dans leurs tests est de 0.3 μ s. Ils affirment aussi que les latences sont proportionnelles à la quantité de dispersion à compenser, puisqu'elles requièrent une mémoire tampon, nécessaire pour en faire le calcul. Le calcul de la dispersion dans le simulateur sert donc à fixer dans le temps un délai de transmission qui est proportionnel à l'accumulation de dispersion. Ce délai peut être ajouté dans le module transmetteur ou récepteur, selon la pré ou la post compensation utilisée. La dispersion finale nécessaire devant être compensée est calculée à l'aide de la relation :

$$\sigma_D = DL\sigma_\lambda \quad (3.4)$$

où D est le coefficient de dispersion chromatique définie ci-dessus, L est la distance totale de propagation dans la fibre optique et σ_λ est la largeur spectrale de la source, à l'injection dans la fibre optique. Les latences de propagation dans la fibre optique sont représentées par le paramètre « Latency_Rate ». Le Tableau 3.3 montre la correspondance des paramètres avec la correspondance de l'utilisation dans le simulateur.

Tableau 3.3 Paramètres de la fibre optique et la correspondance dans le simulateur

Paramètres	Symbole	Valeur	Paramètres correspondants dans le simulateur	Utilisation dans le simulateur	Valeur dans le simulateur	Unité dans le simulateur
Longueur d'onde de dispersion nulle (nm)	λ_0	1313	Zero_Dispersion_Wavelength	Calcul des latences dues à la compensation électronique à partir du vecteur Dispersion_Coefficient.	1313×10^{-9}	m
Pente de dispersion à la dispersion nulle (ps/nm ² ·km)	S_0	0.0086	Zero_Dispersion_Slope	Calcul des latences dues à la compensation électronique à partir du vecteur Dispersion_Coefficient dépendant de λ .	8.6	s/m ³
Atténuation à 1310 (dB/km)	α_{1310}	0.3400	Attenuation_1310	Calcul de l'atténuation à partir du vecteur Atténuation dépendant de λ .	0.34×10^{-3}	dB/m
Atténuation à 1383 (dB/km)	α_{1383}	0.5000	Attenuation_1383	Calcul de l'atténuation à partir du vecteur Atténuation dépendant de λ .	0.50×10^{-3}	dB/m
Atténuation à 1550	α_{1550}	0.1900	Attenuation_1500	Calcul de l'atténuation à partir du vecteur Atténuation dépendant de λ .	0.19×10^{-3}	dB/m
Indice de groupe à 1550 nm	n_g	1.4682	LatencyRate_OpticalFiber	Calcul des délais de propagation dans la fibre optique.	4.90×10^{-9}	s/m
Aire effective (μ m ²)	A_{eff}	84.95	Effective_Area	Effet non linéaire dans le développement futur.	84.95×10^{-12}	m ²
Indice non linéaire (m ² /W)	n_2	3.2×10^{-20}	NonLinear_Index	Effet non linéaire dans le développement futur.	3.2×10^{-20}	m ² /W

3.2.3.2 Atténuation

L'atténuation dans la fibre optique a aussi une influence directe sur la qualité de la transmission à cause de la nécessité d'ajouter des amplificateurs optiques afin de remonter le niveau de puissance du signal. Elle est directement proportionnelle à la distance de propagation et dépend de la longueur d'onde. En connaissant l'atténuation à au moins trois longueurs d'onde comme celle donnée dans les spécifications de la fibre optique Corning SMF-28 et en utilisant une matrice de prédiction, il est possible de calculer l'atténuation à n'importe quelle longueur d'onde selon les intervalles définis par la matrice de prédiction. Nous utilisons cette dernière donnée comme exemple représentatif dans le document de ITU G.650.1 (ITU, 2010), et qui été démontrée applicable pour ce type de fibre optique.

Comme mentionné auparavant, l'atténuation a une influence directe sur le BER final pour chacune des communications établies en changeant les valeurs de « signalPower » et de « wavelengthNoisePower » (courbe spectrale du bruit en fonction de λ) dans le simulateur. L'atténuation en fonction de la longueur est précalculée selon les paramètres du Tableau 3.3 et en utilisant la matrice de prédiction, pour y construire une table de recherche spécifique à ces paramètres, dont on peut voir la courbe dans la Figure 3.2.

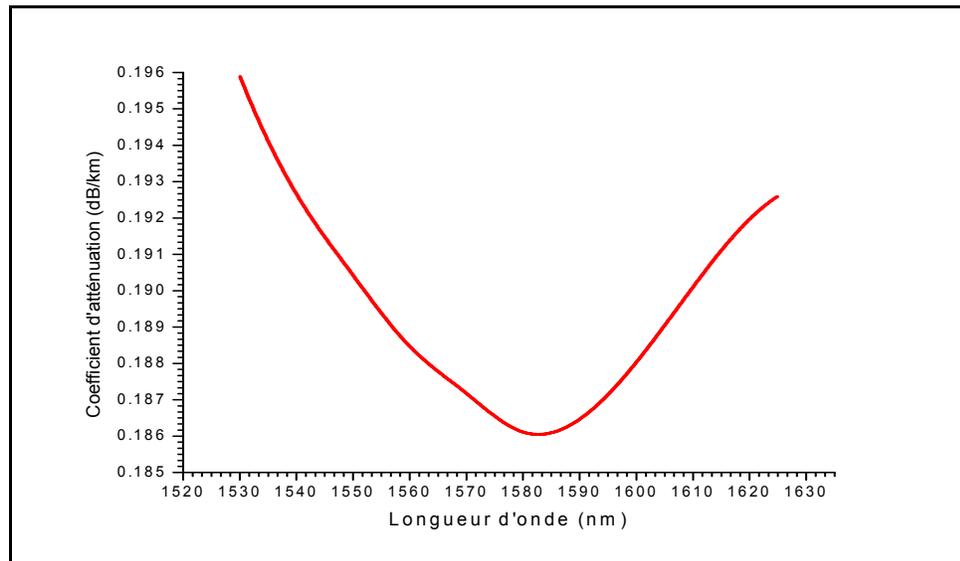


Figure 3.2 Courbe d'atténuation de la fibre optique Corning SMF-28 interpolée sur la grille ITU déterminée à partir de la matrice de prédiction

3.2.3.3 Effets non linéaires

Il est prévisible, dans le développement futur, que les propriétés non linéaires aient une influence sur la diaphonie propagée en équivalence de bruit additionnel dans le spectre de bruit, comme c'est le cas dans les travaux de (Patil, Chaudhari et Li, 2010). C'est aussi à prévoir que la diffusion Raman stimulée, qui est responsable du transfert de puissance des courtes longueurs d'onde vers les longueurs plus élevées, influencera les effets des fluctuations de puissance se propageant dans le réseau (Zyskind, 2011). L'ajout d'un vecteur spécifique pour tenir compte de la diaphonie, séparément du spectre de bruit, sera nécessaire afin de ne pas invalider la modélisation des effets ASE dans les éléments photoniques.

Au moment de rédiger ce mémoire, le modèle n'a pas encore été défini, mais la modélisation aura une influence directe pour déterminer la diaphonie. On évite les effets non linéaires en suivant une règle d'ingénierie découlant des équations (1.2),(1.4),(1.5) et en utilisant les paramètres physiques de la fibre optique SMF-28 du Tableau 3.3. La puissance maximale

approximative par canal, afin d'éviter les effets non linéaires dus au SBS dans la fibre optique SMF-28, est donc de -5.2 dBm. Les signaux DQPSK peuvent permettre un déphasage non linéaire de 0.5 radian jusqu'à 1 radian dépendamment de la fonction de filtrage utilisé (Kumar, 2011). À partir de l'équation (1.6), la puissance d'injection maximale approximative par canal est de -11.3 dBm à -8.2 dBm selon le filtre. La puissance d'injection de -9.5 dBm est choisie pour les simulations avec 88 canaux permettant la stratégie d'évitement des effets XPM.

3.2.4 Amplificateur

La modélisation des amplificateurs dopés à l'erbium est un des aspects les plus critiques du simulateur, puisque le modèle du rapport signal sur bruit optique dépend de celle-ci. Elle permet d'étudier la dynamique de la qualité de transmission en fonction de la charge du réseau découlant de l'ajout et de l'extraction de longueurs d'onde. Une connaissance approfondie du fonctionnement et du comportement des d'amplificateurs dans les systèmes commerciaux est nécessaire si l'ont veut étudier exactement le comportement d'un réseau. Néanmoins à l'aide de modèles simplifiés et interpolés (voir 3.2.4.3), nous pouvons quand même sortir des éléments permettant d'étudier le comportement des réseaux sans filtre. L'ouvrage de (Zyskind, 2011) nous a éclairé grandement sur ce point. Il insiste sur le fait que les opérateurs de réseaux de prochaine génération devront être maîtres du comportement des variations de puissance dans un contexte dynamique. Ceci est aussi vrai dans les réseaux avec ROADM et les réseaux sans filtre.

3.2.4.1 Le modèle des amplificateurs

Le modèle inclut la courbe ASE en fonction du gain de l'amplificateur ainsi que la courbe de gain (ASE suit approximativement la courbe de gain) appliquée aux canaux dont la puissance de chacun est nivelés à la sortie. Plus spécifiquement, le modèle utilise une paramétrisation déterminée à partir de VPI. La Figure 3.3 montre un exemple de la courbe de gain ainsi que

de la courbe ASE correspondante, tandis que la Figure 3.4 montre la puissance du signal avant l'amplificateur (bleu) et dont la variation provient de l'atténuation dans la fibre optique en fonction de la longueur d'onde. Les points en rouges correspondent au gain de la puissance finale avant l'égalisation. La courbe rouge représente le spectre ASE après amplification. La Figure 3.5 représente l'OSNR final de toutes les longueurs d'onde après égalisation à la sortie de cet amplificateur. Puisque tous les amplificateurs n'ont pas tous le même gain cible ni la même puissance d'entrée, cette courbe ne sera pas la même pour tous les amplificateurs. Dans une chaîne d'amplificateurs, la courbe finale de l'OSNR sera donc dépendante de la topologie du réseau. Le modèle simple d'amplificateur avec égalisation se fait de la façon suivante :

- calculer ou interpoler la courbe spectrale de gain de façon à ce que tous les canaux soient au-dessus de la puissance de sortie ciblée;
- calculer ou interpoler la courbe spectrale ASE correspondante au gain et l'ajouter à la courbe finale selon l'équation (3.5);
- mettre la puissance de tous les canaux au gain cible (égalisation parfaite);
- appliquer l'égalisation à la courbe ASE qui correspond à la courbe d'atténuation pour réduire les puissances égales à celle du canal le plus faible avant l'égalisation (égalisation par atténuation).

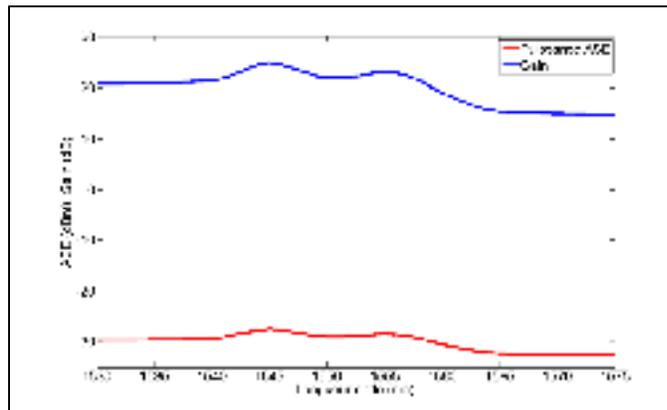


Figure 3.3 Courbe de gain (bleu) et puissance des émissions spontanées amplifiées (rouge), typiques des amplificateurs optiques à l'erbium. Les courbes sont obtenues avec une puissance de pompage avant de 8 mW sur 14 m de fibre optique
Adaptée de Becker, Olsson et Simpson (1999)

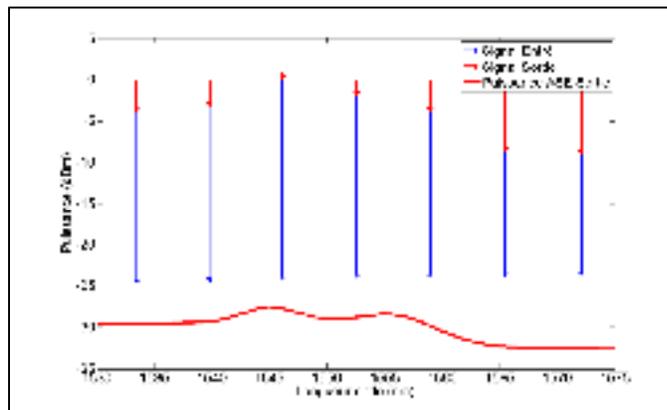


Figure 3.4 Sept canaux avant (bleu) et après l'EDFA (rouge) et avant l'égalisateur ainsi que le bruit ASE correspondant aux mêmes conditions de la figure précédente

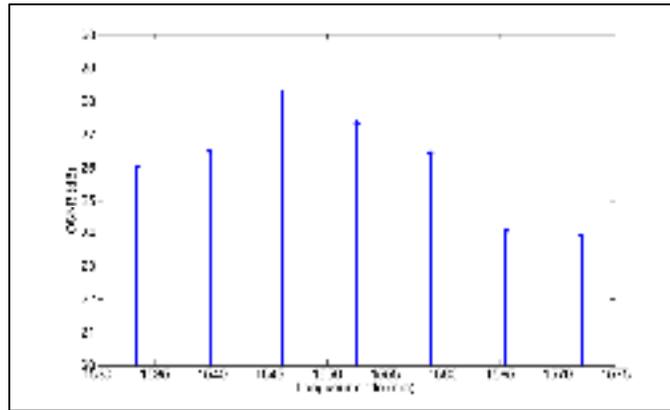


Figure 3.5 Rapport signal sur bruit optique après l'égalisation

Mathématiquement, le bruit est additionné selon cette relation :

$$\overline{Pn_o}(\lambda) = 10 \log_{10} \left(10^{\frac{(\overline{Pn_i}(\lambda) + \overline{G_A}(\lambda))}{10}} + 10^{\frac{(\overline{N_A}(\lambda))}{10}} \right) \quad [dBm] \quad (3.5)$$

Où $\overline{G_A}$ et $\overline{N_A}$ sont respectivement le gain et la puissance de bruit de l'amplificateur en fonction de la longueur d'onde.

3.2.4.2 Modèle de la dynamique des amplificateurs

Les travaux de (Qian et Chongcheng, 1999), ont élaboré un simple modèle dynamique pour des amplificateurs EDFA, dont le gain est nivelé dans le temps. Les figures 3.6 et 3.7 montrent les variations de puissance dans une chaîne d'amplificateurs à l'extraction puis l'ajout de 7 canaux sur 8 (Figure 3.6) ainsi qu'à l'extraction puis à l'ajout de 4 canaux sur 8 (Figure 3.7). Dans chacune des figures, on voit, les variations de la puissance à la sortie de 1, de 5 et de 10 amplificateurs en cascade. Qualitativement, nous pouvons en déduire cinq principales caractéristiques :

- période d'oscillation à l'ajout de canaux;

- période d'oscillation à l'extraction de canaux;
- puissance maximale d'oscillation dépendante de la variation de puissance entre l'ajout ou l'extraction des canaux et ceux restant;
- puissance maximale d'oscillation dépendante du nombre d'EDFA traversés en cascade;
- le temps de relaxation dépendant du nombre d'EDFA traversés en cascade.

Le rétablissement initial à la suite d'un nombre d'EDFA est simplement la somme des rétablissements des EDFAs de chaque EDFA, qui entraîne, un temps de réponse proportionnel aux nombres d'EDFAs dans la chaîne (Zyskind, 2011).

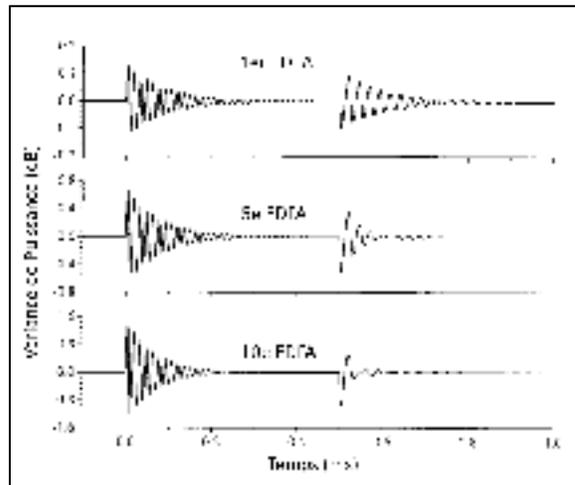


Figure 3.6 Variation de puissance d'un canal survivant lorsque 7 des 8 canaux sont extrait puis ajoutés après 1, 5 et 10 amplificateurs en cascade

Tiré de Qian et Chongcheng (© 1999 IEEE)

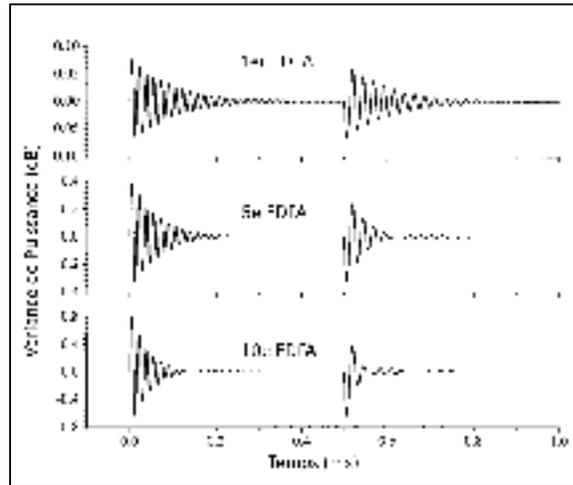


Figure 3.7 Variation de puissance d'un canal survivant lorsque 4 des 8 canaux sont extraits puis ajoutés après 1, 5 et 10 amplificateurs en cascade
Tiré de Qian et Chongcheng (© 1999 IEEE)

L'implantation de cette dynamique dans le simulateur n'est pas encore réalisée, mais sera importante dans les travaux subséquents. Étant donné que l'effet est plus significatif lorsque l'écart de la puissance à l'ajout ou à l'extraction est grand. Cette modélisation permettra surtout d'étudier le plan de contrôle dans une situation de protection, par exemple, une défaillance d'un nœud, un bris de fibre optique, etc. Les différents mécanismes pouvant causer ces variations de puissance rapides sont exposés dans le Tableau 3.4.

Tableau 3.4 Causes des variations rapides de puissance
Tiré de Zyskind (2011, p. 203)

Mécanisme	Temps de commutation
Coupure de fibre optique	> 1 ms
Déconnexion d'un connecteur	> 100 μ s
Bris d'une épissure	< 1 μ s
Commutation optique	500 μ s ... 10 ms
Défaillance d'une carte	5 ms

La Figure 3.8 montre les caractéristiques importantes de la courbe de variation de puissance aux temps correspondants. À ces moments, dans le simulateur, un message de variation de puissance sera émis selon les conditions d'ajout ou d'enlèvement et le nombre d'amplificateurs traversés. Les valeurs contenues dans les messages seront déterminées par la paramétrisation du modèle, qui devra être développé. Ces messages dans le temps sont :

- puissance maximale/minimale (enlèvement/ajout) du premier temps de sur/sous (enlèvement/ajout) oscillations pour chacun des canaux;
- puissance maximale/minimale (enlèvement/ajout) du deuxième temps de sur/sous (enlèvement/ajout) oscillations pour chacun des canaux;
- puissance minimale au temps de demi-réponse transitoire;
- puissance finale à la fin de la réponse transitoire.

Ceci a pour but d'évaluer la perturbation sur le BER des communications en cours suite aux fluctuations de puissance. Ces fluctuations peuvent faire en sorte que la puissance tombe sous la limite de sensibilité du récepteur ou encore elle peut être si élevée que les effets non linéaires apparaissent et dégradent la qualité de la transmission. Dans l'article de (Qian et Chongcheng, 1999), l'ajout et l'extraction se font abruptement alors qu'en réalité, l'augmentation de puissance du laser à l'allumage d'une longueur d'onde est graduelle. La magnitude de cet effet, qui sera moindre, doit aussi être déterminée.

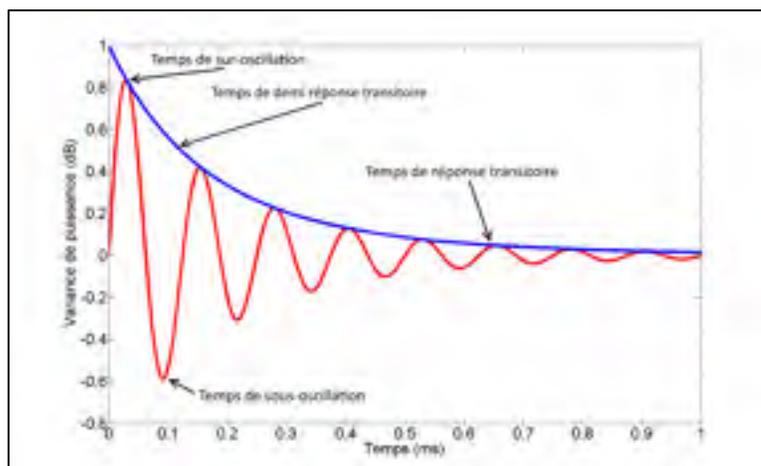


Figure 3.8 Exemple de variation de la puissance en fonction du temps à l'extraction de canal, démontrant les quatre événements fixés en temps dans le simulateur, lesquels résultent en une propagation de l'effet transitoire et un effet sur la qualité de la transmission

Le tableau 3.5 montre un exemple de paramètres d'amplificateur optique commercial avec gain nivelé et leur utilisation dans le simulateur.

Tableau 3.5 Exemple des paramètres d'un amplificateur optique avec gain nivelé et leurs correspondances dans le simulateur. Les paramètres transitoires sont avec ajout et extraction de 16 dB de puissance (Oclaro)

Paramètres	Symbole	Valeur	Paramètres correspondants dans le simulateur	Utilisation dans le simulateur	Valeur dans le simulateur	Unité dans le simulateur
Puissance cible égalisée par canal (dB)	P_{chan}	-9.5 dBm	TargetGain	Puissance cible de chacun des canaux après égalisation. (Amplificateur de ligne)	-9.5	dBm
Période d'oscillation ajout (us)	T_{Add}	0.2	AddPeakTime	Temps pour le minimum de la variance d'ajout de canaux.	0.1×10^{-6}	s
Période d'oscillation enlèvement (us)	T_{Drop}	0.1	DropPeakTime	Temps pour le maximum de la variance d'enlèvement de canaux.	0.05×10^{-6}	s
Temps de réponse transitoire (us)	t_{trans}	500	TransientTime	Temps pour la stabilisation de la réponse transitoire.	500×10^{-6}	s
Ajout variance puissance maximale	P_{Add}	1	TransientOvershoot	Variance maximale de la puissance à l'ajout d'un canal.	1	dB
Enlèvement variance puissance maximale	P_{Drop}	1.5	TransientUndershoot	Variance minimale de la puissance à l'enlèvement d'un canal.	1.5	dB
ASE	$P_{ASE}(G, \lambda)$	--	--	Ajout de la contribution de la densité spectrale au vecteur de bruit qui est calculée en fonction de la courbe de gain.	--	dBm

3.2.4.3 Paramétrisation des amplificateurs optiques

Puisque la puissance d'entrée de chaque canal dans l'amplificateur est approximativement égale et que les puissances de sortie cibles sont, toutes deux, prédéterminées, nous pouvons considérer les amplificateurs comme opérant en régime saturé et en mode de gain constant. Le logiciel VPItransmissionMakerTM est utilisé pour caractériser les amplificateurs dont le montage est présenté à la Figure 3.9.

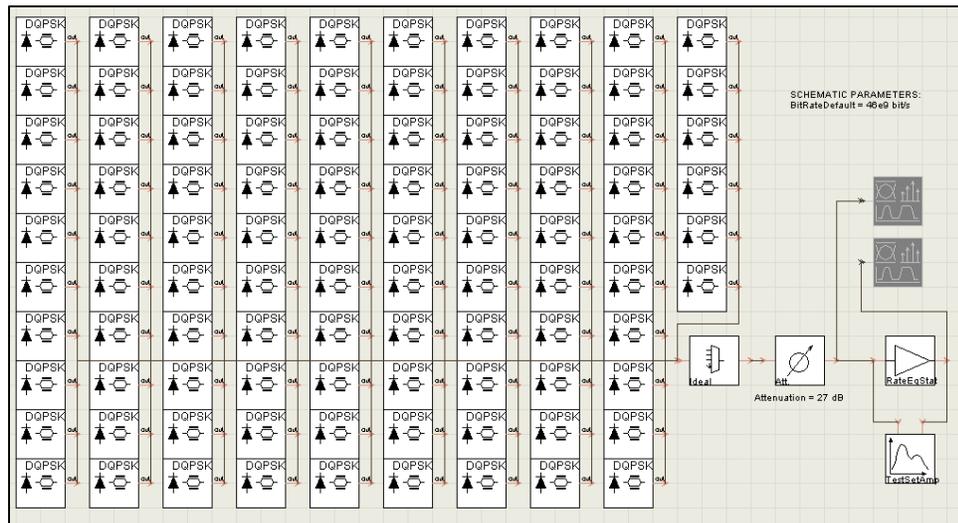


Figure 3.9 Montage VPI pour effectuer la caractérisation des amplificateurs

Les transmetteurs utilisent le format de modulation DQPSK à 46 Gb/s et le tableau 3.6 montre les valeurs utilisées par les amplificateurs EDFA. Le montage comprend 96 de ces transmetteurs ayant leur longueur d'onde d'émission assignée entre 1528.77 nm et 1566.72 nm avec 50 GHz d'espacement. Un atténuateur variable est placé à la suite du multiplexeur pour faire varier la puissance des canaux à l'entrée de l'amplificateur. Un script TCL effectue un balayage des longueurs d'onde et allume les transmetteurs. En premier lieu, chaque transmetteur est allumé et fermé un à la fois produisant une caractérisation de l'amplificateur avec une puissance d'entrée donnée (selon l'atténuateur) et selon la puissance de pompage. Nous enregistrons la puissance de sortie du signal et du bruit ASE dans ces conditions.

Il est à noter que la puissance totale de pompage est répartie avec 2/3 de la puissance à la pompe avant, à 1480 nm, et avec 1/3 à la pompe arrière, à 980 nm. En deuxième lieu, deux transmetteurs à la fois sont allumés et fermés, séparés par 48 canaux, pour faire le balayage des 96 canaux. En troisième lieu, le processus est poursuivi avec 4 canaux (24 canaux d'espacement), 8 canaux (12 canaux d'espacement), 16 canaux (6 canaux d'espacement), 32

canaux (3 canaux d'espacement) et 64 canaux (1 canal d'espacement). Pour le cas de 64 canaux, l'espacement n'est pas un multiple de deux. Le balayage commence par une extrémité des 96 canaux jusqu'à l'autre extrémité sans espacement entre les canaux.

Tableau 3.6 Paramètres utilisés par VPI pour caractériser les amplificateurs EDFA

Paramètre	Valeur
Nom du modèle	AmpEDFA_RateEqStat_V2
Longueur de fibre optique	20.0 m
Section efficace	AlGeErSilicaSigma.dat
Durée de vie	10×10^{-3} s
Concentration Erbium	2.5×10^{24} m ⁻³
Rayon du cœur Erbium	1.5×10^{-6} m
Longueur d'onde de pompage avant	1480 nm
Longueur d'onde de pompage arrière	980 nm

Une moyenne est effectuée sur les canaux qui se chevauchent. Le balayage continue avec 72, 80, 88 et 96 canaux, collés ensemble et déplacés d'une extrémité à l'autre. Une moyenne est aussi effectuée sur les canaux qui se chevauchent. Ce processus est répété en faisant varier la puissance totale de pompage de 3 dBm à 35 dBm en saut de 2 dBm. Le processus est poursuivi, cette fois-ci, en variant l'atténuateur de 3 dB à 27 dB par sauts de 3 dB. Ceci permet de caractériser numériquement les amplificateurs sur la plage d'opération avec une puissance d'entrée de -11 dBm à -35 dBm par canal sur toutes les longueurs avec la puissance de sortie du signal et du bruit en fonction de la puissance de pompage.

À partir de ces données, deux matrices tridimensionnelles sont créées en fonction de la puissance de pompe minimale pour atteindre la puissance de sortie par canal, qui sera égalisée par atténuation à la puissance cible. La première matrice représente la puissance de sortie et la deuxième représente le bruit ASE à la sortie de l'amplificateur. Les valeurs correspondant au nombre de canaux présents dans l'amplificateur de 1 à 96 en saut de 1

canal, la puissance d'entrée entre -35.0 dBm et -5.0 dBm en saut de 0.5 dBm ont été interpolées à l'aide du logiciel Matlab avec la fonction d'interpolation 3D (`interp3`) et la méthode de spline cubique. Les trois axes de cette matrice tridimensionnelle sont la longueur d'onde, le nombre de canaux et la puissance à l'entrée de l'amplificateur. Les deux matrices servent de table de recherche pour interpoler les valeurs selon les conditions. La paire de matrices existe pour les valeurs cibles à la sortie de -11.5 dBm à 5.5 dBm par canal en saut de 2 dBm.

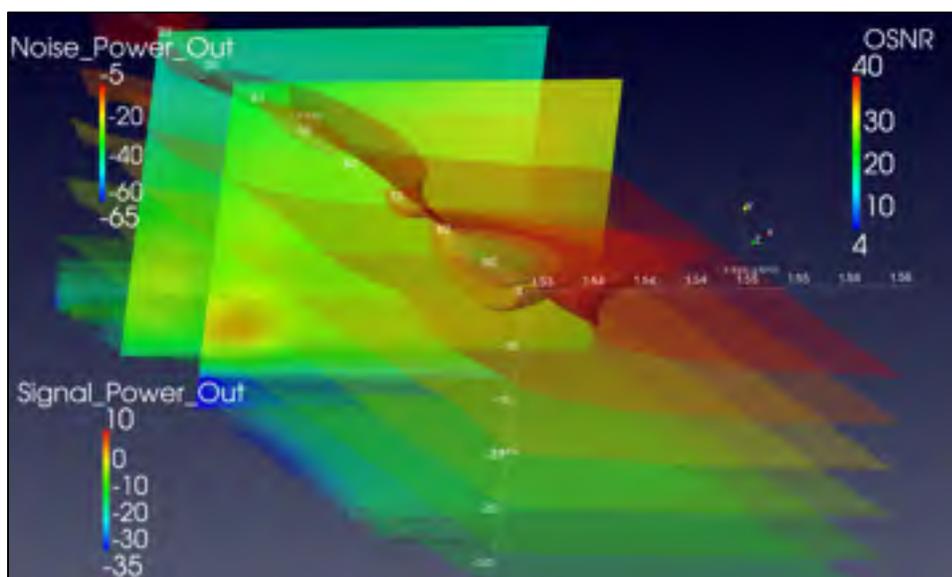


Figure 3.10 Visualisation des résultats de la caractérisation de l'amplificateur optique à l'aide de deux matrices de caractérisation tridimensionnelles pour -9.5 dBm à la puissance par canal de sortie cible

La Figure 3.10 montre les résultats de la caractérisation de l'amplificateur à l'aide de deux matrices de caractérisation tridimensionnelles pour -9.5 dBm à la puissance par canal de sortie cible. Dans cette figure, l'axe des x représente la longueur d'onde, l'axe des y, la puissance d'entrée du canal et l'axe des z (sortant du plan), le nombre de canaux. Les surfaces horizontales représentent les courbes isométriques du rapport signal sur bruit optique (OSNR) de 4 (bleu) à 40 (rouge) correspondant à l'échelle. Le plan vertical le plus profond représente la puissance de bruit (*Noise_Power_Out*) pour 16 canaux, en fonction de la

puissance d'entrée et de la longueur d'onde. Quant au plan vertical le plus rapproché, il représente la puissance de sortie par canal avant l'égalisation (*Signal_Power_Out*), pour 32 canaux, et lui aussi, en fonction de la puissance d'entrée et de la longueur d'onde. Dans le simulateur et grâce à ces matrices, les puissances de sortie du signal et du bruit sont interpolées à l'aide de la méthode de rééchantillonnage par interpolation bilinéaire.

3.2.5 Récepteur

Dans cette architecture proposée, nous avons deux types de récepteurs. Le premier type est un simple récepteur PIN composé d'InGaAs avec détection directe du canal de contrôle et du canal de découverte de la topologie. Le deuxième type est un récepteur plus complexe dont l'accord se fait à l'aide d'un laser agissant comme oscillateur local et composé de quatre de ces photodiodes PIN InGaAs pour effectuer la démodulation du format DQPSK.

Dans le cas des simples PIN, nous modélisons la performance du signal directement à partir d'équations, alors que dans le cas de ceux des récepteurs DQPSK, la performance est déterminée par la caractérisation à l'aide de VPI TransmissionMaker™.

3.2.5.1 Récepteur PIN

La responsivité du récepteur dépend de la longueur d'onde à cause de l'énergie qui dépend elle-même de la longueur d'onde. En ignorant la courbe de coupure due à l'énergie minimum nécessaire d'un photon pour libérer un électron, la responsivité peut être approximée et, comme c'est le cas dans le simulateur par (Saleh et Teich, 2007) :

$$R = \frac{\eta q}{h\nu} = \frac{\eta \lambda}{1.24} \quad (3.6)$$

Le bruit dû à la variance du photocourant (*shot noise*) est donné par la relation (Saleh et Teich, 2007):

$$\sigma_s^2 = 2e\bar{i}B \quad (3.7)$$

où e est la charge de l'électron, \bar{i} est le courant moyen dans la photodiode et B est la bande passante du circuit.

Le bruit dû à la variance thermique (*Thermal Noise*) provenant de la résistance R dans le circuit est donné par :

$$\sigma_t^2 \approx \frac{4k_B T B}{R} \quad (3.8)$$

où k_B est la constante de Boltzmann et T est la température en Kelvin.

Nous pouvons donc quantifier le rapport sur signal sur bruit électrique par :

$$SNR = \frac{P_s R}{P_n R + \sigma_s^2 + \sigma_t^2} \quad (3.9)$$

où P_s et P_n sont respectivement la puissance du signal et celle du bruit.

Le facteur Q , qui est une mesure de la qualité du signal, se définit en relation avec le SNR, lors de faible interférence inter symbole, par (Keiser, 2000):

$$Q = \sqrt{\frac{SNR}{4}} \quad (3.10)$$

À partir du facteur Q , le BER final (sans FEC) du signal avec supposition de statistique gaussienne est approximativement donné par (Keiser, 2000):

$$BER \approx \frac{e^{-Q^2/2}}{Q\sqrt{2\pi}} \quad (3.11)$$

Finalement, pour calculer le BER théorique après le FEC, nous utilisons le code de Reed-Solomon (239-255), comme celle qui est recommandée dans le standard OTN et par l'ITU dont la formule est (ITU, 2000):

$$P_{UE} = \sum_{i=9}^N \frac{i}{N} \binom{N}{i} P_{SE}^i (1 - P_{SE})^{N-i} \quad N = 255 \quad (3.12)$$

où

$$BER_{entrée} = 1 - (1 - P_{SE})^{\frac{1}{8}} \quad (3.13)$$

et

$$BER_{sortie} = 1 - (1 - P_{UE})^{\frac{1}{8}} \quad (3.14)$$

dont P_{UE} est la probabilité d'une erreur non corrigible, P_{SE} est la probabilité d'erreur d'un symbole (octet) et N est la longueur du mot codé (255). Le Tableau 3.7 présente les paramètres importants utilisés dans le simulateur pour représenter un récepteur et calculer la qualité de la transmission.

Tableau 3.7 Exemple des paramètres de récepteurs avec la correspondance dans le simulateur

Paramètres	Symbole	Valeur	Paramètres correspondants dans le simulateur	Utilisation dans le simulateur	Valeur dans le simulateur	Unité dans le simulateur
Type de récepteur	--	PIN	RxType	Utilisé dans le calcul du BER final.	"PIN"	—
Matériel	--	InGaAs	material	Utilisé dans le calcul du BER final.	"InGaAs"	-
Responsivité à 1550 nm (A/W)	R	0.89	Responsivity	Utilisé dans le calcul du BER final.	0.89	A/W
Efficacité quantique (%)	η	71	QuantumEfficiency	Utilisé dans le calcul du BER final.	0.71	—
Temps d'accord (ms) [spéculatif]	τ_{tune}	10	TuningTime	Temps moyen pour accorder le récepteur, lorsque stabilisé. Peut suivre une distribution statistique.	10×10^{-3}	s
Temps de stabilisation (s) [spéculatif]	t_{warmup}	60	WarmupTime	Le temps nécessaire pour stabiliser un récepteur, lorsqu'il initialement allumé.	60	s
Délai de démodulation (μ s) [spéculatif]	t_{mod}	0.3	Latency_DeModulator	Délai ajouté lors de la démodulation à la réception d'un message optique.	0.3×10^{-6}	s

3.2.5.2 Paramétrisation des récepteurs DQPSK

À cause de la complexité des transmetteurs-récepteurs DQPSK, une caractérisation est faite à l'aide de VPI plutôt que d'établir un modèle analytique. La Figure 3.11 montre le montage VPI utilisé pour effectuer cette caractérisation. Un amplificateur idéal, dont on fait varier la figure de mérite (NF), est placé dans le système comme source de bruit. De plus, il y a un atténuateur placé entre le transmetteur et l'amplificateur pour faire varier la puissance d'entrée du canal dans l'amplificateur. Le module récepteur DQPSK calcule le BER final à l'aide de statistiques gaussiennes et le résultat est envoyé dans un fichier. Un script balaie la longueur d'onde assignée entre 1528.77 nm et 1566.72 nm avec 50 GHz d'espacement. La valeur de l'atténuateur est variée de 0 à 33 dB en saut de 3 dB, tandis que la figure de bruit est variée entre 1 à 50 en saut de 1.

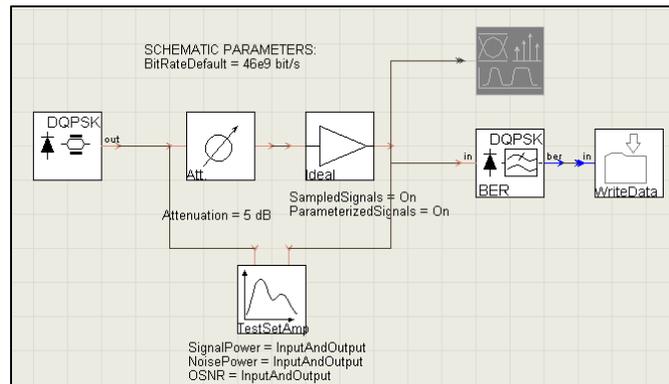


Figure 3.11 Montage VPI pour effectuer la caractérisation du BER dans un système amplifié avec transmetteurs-récepteurs DQPSK à 46 Gb/s

Ceci permet donc de caractériser le BER du système en fonction de la longueur d'onde, de la puissance du signal et du bruit d'entrée au récepteur. Les valeurs correspondant à la puissance d'entrée du signal dans le récepteur sont entre -40.0 et 0.0 dBm en saut de 1 dBm et celles de la puissance d'entrée du bruit, entre -65.0 et -5.0 dBm en saut de 1 dBm. Toutes ces valeurs ont été interpolées à l'aide du logiciel Matlab avec la fonction d'interpolation 3D (interp3) et la méthode de spline cubique. À partir de cette matrice tridimensionnelle importée dans le simulateur, le BER en fonction de la puissance du signal, du bruit et de la longueur d'onde est interpolé à l'aide de la méthode de rééchantillonnage par interpolation bilinéaire. La Figure 3.12 présente un plan de cette matrice à 1550 nm.

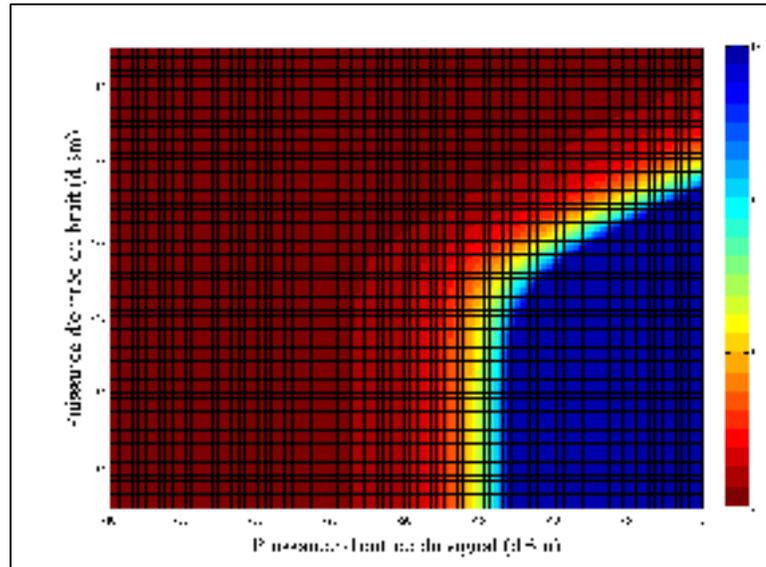


Figure 3.12 Caractérisation du BER pour un système à DQPSK à 1550 nm. L'axe de x correspond à la puissance d'entrée du signal alors que l'axe de y, à la puissance du bruit. La couleur est la valeur correspondant à $-10 \log_{10}(BER)$ avant FEC

Il est à noter qu'il y a une dépendance de la réponse du récepteur à la longueur d'onde, même si elle est faible. Elle est incluse par l'équation (3.6) dans le simulateur pour s'assurer que tous les éléments soient pris en compte.

Donc avec tous ces modèles et ces paramètres, une estimation dynamique de la qualité de la transmission en cours est possible. Cela facilite le développement et la validation du plan de contrôle.

CHAPITRE 4

MODÉLISATION DE LA COMMUNICATION

4.1 Définition des paramètres de métrologie au niveau réseau

Dans le but d'évaluer la capacité des réseaux sans filtre en fonction de la performance dans un contexte dynamique, nous supposons un système décrit par un modèle de file d'attente M/M/m/m à chacun des nœuds (Bertsekas et Gallager, 1987). Les demandes de connexion arrivent à chacun des nœuds selon un taux des arrivées λ suivant un processus de Poisson. Le temps de service des demandes est exponentiel avec une moyenne de $1/\mu$ secondes. Le m correspond au nombre de transmetteurs (serveur dans la théorie des files d'attente) et indique qu'il n'y a aucune place dans la file d'attente, c'est-à-dire qu'aucune autre demande ne peut être satisfaite. Elle est simplement rejetée. Le ratio d'utilisation est défini de façon générale par:

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu} \quad (4.1)$$

Ou encore, le ratio d'utilisation normalisé à chacun des nœuds par :

$$\hat{\rho} = \frac{\lambda}{n\mu} \quad (4.2)$$

La probabilité d'avoir n transmetteurs occupés à chacun des nœuds découle d'une analyse par chaîne de Markov (Bertsekas et Gallager, 1987) et est donné par :

$$p_n = p_0 \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^n \frac{1}{n!}, \quad n = 1, 2, \dots, m \quad (4.3)$$

où

$$p_0 = \left[\sum_{n=0}^m \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^n \frac{1}{n!} \right]^{-1} \quad (4.4)$$

Tandis que la probabilité qu'une demande de connexion soit bloquée est :

$$p_m = \frac{(\lambda / \mu)^m / m!}{\sum_{n=0}^m (\lambda / \mu)^n / n!} \quad (4.5)$$

Cette équation est connue sous le nom de la formule Erlang-B, déduite par Agner Krarup Erlang (Bertsekas et Gallager, 1987). Finalement, le nombre moyen de connexions dans chaque nœud est donné par :

$$\bar{N} = \sum_{n=0}^m n p_n \quad (4.6)$$

Les équations (4.5) et (4.6) nous servent de métrique de référence pour comparer la performance dynamique des réseaux sans filtre soumis à une topologie particulière et l'effet du plan de contrôle. Elles donnent respectivement la probabilité de blocage ainsi que le trafic moyen dans le réseau en fonction de la charge de ce dernier, en ne considérant que le nombre de transmetteurs disponibles analogue au nombre de serveurs m . À un certain point, le réseau devient limité par sa capacité en canaux et ces équations nous donnent aussi cette limite. Par convention dans ce mémoire, le ratio d'utilisation est défini à chacun des nœuds et non dans le réseau entier. Il suffit de le multiplier par le nombre de nœuds pour retrouver le ratio d'utilisation global du réseau, en supposant le même nombre de transmetteurs, le taux des arrivées ainsi que le même taux de service à chacun des nœuds.

Dans le simulateur, le trafic dans le réseau *TotalNetworkTraffic*, n'est déterminé qu'avec le nombre de connexions établies dans la table de routage global n_{Grt} , à un moment spécifique. Cette donnée n'est pas accessible pour le plan de contrôle distribué, parce qu'elle n'est pas toujours à jour, mais elle est évidemment disponible pour le simulateur. Un autre paramètre de mesure est l'utilisation des liens *linkUtil*, qui est le ratio d'utilisation des canaux par chaque connexion connue par le plan de contrôle de chacun des nœuds et moyenné sur tout le réseau. Le linkUtil s'exprime mathématiquement par :

$$linkUtil = \frac{\sum_{ol=1}^{n_{ol}} linkload_{ol}}{n_{ol}} \quad (4.7)$$

où

$$linkLoad = \frac{n_{uc}}{n_{Tc}} \quad (4.8)$$

n_{Tc} est le nombre maximal de canaux, n_{uc} est le nombre de canaux utilisés et n_{ol} est le nombre de liens optiques dans tout le réseau. Une quantité très rapprochée à celle de l'équation (4.7) est l'utilisation moyenne des canaux *networktreeUtil*, exprimée en ratio sur l'ensemble de tous les arbres de fibres optiques et connue globalement par le simulateur. Elle est définie par :

$$networktreeUtil = \frac{n_{Grt}}{n_{Tc}n_{Tf}} \quad (4.9)$$

où n_{Tf} est le nombre d'arbres de fibres optiques unique dans le réseau. Évidemment, nous avons aussi le ratio d'utilisation de canaux *treeUtil* pour chacun des arbres de fibres optiques :

$$treeUtil_i = \frac{n_{uc_i}}{n_{Tc}}, \quad , i = 1 \dots n_t \quad (4.10)$$

Le ratio d'utilisation des transmetteurs à chacun des nœuds est aussi défini respectivement par :

$$transmitterUtil_i = \frac{n_{t_i}}{n_{T_i}}, \quad , i = 1 \dots n_n \quad (4.11)$$

où n_{t_i} est le nombre de transmetteurs utilisés dans le nœud, n_{T_i} est le nombre total de transmetteurs dans le nœud et n_n est le nombre total de nœuds dans le réseau. Alors que pour les récepteurs, le ratio d'utilisation est :

$$receiverUtil_i = \frac{n_{r_i}}{n_{R_i}}, \quad , i = 1 \dots n_n \quad (4.12)$$

où n_{r_i} est le nombre de transmetteurs utilisés dans le nœud n_{R_i} et est le nombre total de récepteurs dans le nœud.

Finalement, nous définissons le trafic normalisé à chacun des nœuds par :

$$nodeTraffic_i = \frac{n_{rt_i}}{n_{Tc} d_i}, \quad , i = 1 \dots n_n \quad (4.13)$$

où n_{rt} est le nombre de connexions dans le nœud et d est le degré de celui-ci.

À titre d'exemple, les deux tableaux suivants présentent les déclarations ayant rapport aux messages photoniques. La Tableau 4.1 montre les types de messages photoniques possibles communiquant entre les éléments dans la couche physique et leurs actions sur cette couche. La Figure 4.2 contient la déclaration C++ d'un objet *PacketStat* contenant les propriétés de la couche photonique contenue dans le message photonique.

Tableau 4.1 Message photonique pour communication dans la couche physique avec les différents types de messages agissant de manière spécifique sur les composantes et le signal

Paramètre	Utilité
TXstart	Ajout d'une longueur d'onde se propageant dans la couche physique.
TXstop	Enlèvement d'une longueur d'onde se propageant dans la couche physique.
PLlevel	Réglage de la puissance optique d'une longueur d'onde.
PLlevel_FirstShoot	Puissance maximale du premier saut due à l'ajout ou à l'extraction d'une ou de plusieurs longueurs d'ondes dans un EDFA.
PLlevel_SecondShoot	Puissance maximale du deuxième saut due à l'ajout ou à l'extraction d'une ou de plusieurs longueurs d'ondes dans un EDFA.
PLlevel_HalfTime	Puissance maximale au demi-temps transitoire due à l'ajout ou à l'extraction d'une ou de plusieurs longueurs d'ondes dans un EDFA.
PLlevel_FullTime	Puissance finale au temps transitoire due à l'ajout ou à l'extraction d'une ou de plusieurs longueurs d'ondes dans un EDFA.
VTXstart	Début d'un message (ex. : Ethernet) provenant de la couche supérieure et se propageant dans la couche physique (encapsulation).
VTXstop	Fin d'un message (ex. : Ethernet) provenant de la couche supérieure et propageant dans la couche physique (encapsulation).

```

class PacketStat {
public:
    PacketStat();
    PacketStat(PacketStat*);
    ~PacketStat();

    double wavelength;
    int numWDMChannels;
    double signalPower;

    double propagationLoss;
    double accumulated_dispersion;
    int amp_count;

    // used to track chain
    PacketStat* next;
    PacketStat* prev;
    double currInsertionLoss;

    void setTimestamp(std::string name, simtime_t time);
    void addWavelengthNoisePower(double wavelength, double value);
    bool resetWavelengthNoisePower(double wavelength);
    double getWavelengthNoisePower(double wavelength);
    double getTotalWavelengthNoisePower();
    std::map <std::string, simtime_t> timestamp;

    double laserNoisePower; // intensity noise at laser
    double messageNoisePower; // in band noise
    std::map <double, double> wavelengthNoisePower; // out of band noise
};

```

Figure 4.2 Objet C++ PacketStat servant à communiquer les propriétés de la couche physique entre les éléments photoniques

Finalement, pour faire la démonstration des modalités de liaison entre les éléments dans ce simulateur à événement discret, nous présentons deux exemples de communications à différents niveaux de couches, dans un lien simple, comme à la Figure 4.3.

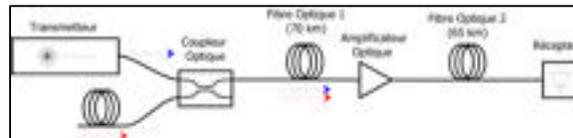


Figure 4.3 Couche physique d'un lien optique servant comme démonstration de la propagation des messages

Le Tableau 4.2 montre les messages partant du contrôleur d'un nœud jusqu'à la réception par le récepteur d'un autre nœud de la figure précédente.

Tableau 4.2 Exemple de propagation des différents messages ayant rapport à la couche physique d'un lien et agissant directement sur cette dernière telle qu'à la Figure 4.3

Temps (ms)	Module du message sortant	Message	Données et variables	Commentaire
0.000000	Contrôleur	Electronic Message: tx_setwavelength_req	1533.47	Demande de réglage de la longueur d'onde.
11.000000	Interface Contrôle	Electronic Message : tx_setwavelength_grant	1533.47	Longueur réglée en 11 ms.
11.000000	Contrôleur	Electronic Message: tx_setpower_req	0 (dBm)	Demande de réglage de la puissance moyenne.
12.000000	Interface Contrôle	Electronic Message : tx_setpower_grant	0 (dBm)	Ajustement de la puissance moyenne en 1 ms.
12.000000	Contrôleur	Electronic Message: tx_open_shutter_req		Demande d'ouverture du faisceau laser.
12.500000	Interface Contrôle	Electronic Message: tx_open_shutter_req		Ouverture du faisceau laser en 0.5 ms.
12.500000	Transmetteur	Photonic Message TXstart	wavelength = 1533.47 signalPower = 0 accumulated_dispersion = 0 wavelengthNoisePower = -150	Propagation du faisceau laser à la sortie du transmetteur.
12.500000	Coupleur optique	Photonic Message TXstart	wavelength = 1533.47 signalPower = -3.2 accumulated_dispersion = 0 wavelengthNoisePower = -153.2 + contributions de l'autre branche	Propagation du faisceau laser à la sortie du coupleur optique.
12.850000	Fibre optique 1 (70 km)	Photonic Message TXstart	wavelength = 1533.47 signalPower = -16.5 accumulated_dispersion = 112 wavelengthNoisePower = -166.5 + contributions	Propagation du faisceau laser à la sortie de la première fibre optique.
12.850000	Amplificateur optique	Photonic Message TXstart	wavelength = 1533.47 signalPower = 0 accumulated_dispersion = 112 wavelengthNoisePower = -30 + contributions Amp_Count = 1	Propagation du faisceau laser à la sortie de l'amplificateur optique.
12.850200	Amplificateur optique	Photonic Message Plevel_FirstShoot	wavelength = 1552.52 signalPower = -0.5 (dépend de Amp_Count et nombre canaux)	Fluctuation de la puissance due à l'ajout d'une longueur d'onde.

Tableau 4.3 (Suite) Exemple de propagation des différents messages ayant rapport à la couche physique d'un lien et agissant directement sur cette dernière telle qu'à la Figure 4.3

Temps (ms)	Module du message sortant	Message	Données et variables	Commentaire
12.850400	Amplificateur optique	Photonic Message Plevel_SecondShoot	wavelength = 1552.52 signalPower = 0.5 (dépend de Amp_Count et nombre canaux)	Fluctuation de la puissance des longueurs d'onde déjà établies due à l'ajout d'une longueur d'onde.
13.100400	Amplificateur optique	Photonic Message Plevel_HalfTime	wavelength = 1552.52 signalPower = -0.25 (dépend de Amp_Count et nombre canaux)	Fluctuation de la puissance des longueurs d'onde déjà établies due à l'ajout d'une longueur d'onde.
13.175000	Fibre optique 2 (65 km)	Photonic Message TXstart	wavelength = 1533.47 signalPower = -12.35 accumulated_dispersion = 216 wavelengthNoisePower = -42.35 + contributions	Propagation du faisceau laser à la sortie de la deuxième fibre optique.
13.175000	Récepteur	...	wavelength = 1533.47 OSNR = 30 dB	Réception du faisceau laser au récepteur
13.175200	Fibre optique 2 (65 km)	Photonic Message Plevel_FirstShoot	wavelength = 1552.52 signalPower = -12.85	Fluctuation de la puissance des longueurs d'onde déjà établies due à l'ajout d'une longueur d'onde.
13.175400	Fibre optique 2 (65 km)	Photonic Message Plevel_SecondShoot	wavelength = 1552.52 signalPower = 11.85	Fluctuation de la puissance des longueurs d'onde déjà établies due à l'ajout d'une longueur d'onde.
13.350400	Amplificateur optique	Photonic Message Plevel_FullTime	wavelength = 1552.52 signalPower = 0	Fluctuation de la puissance des longueurs d'onde déjà établies due à l'ajout d'une longueur d'onde.
13.425400	Fibre optique 2 (65 km)	Photonic Message Plevel_HalfTime	wavelength = 1552.52 signalPower = -12.6	Fluctuation de la puissance des longueurs d'onde déjà établies due à l'ajout d'une longueur d'onde.
13.675400	Fibre optique 2 (65 km)	Photonic Message Plevel_FullTime	wavelength = 1552.52 signalPower = -12.35	Fluctuation de la puissance des longueurs d'onde déjà établies due à l'ajout d'une longueur d'onde.
...

Dans ce tableau, on voit qu'il y a une fluctuation de puissance entre les temps 13.1752 ms et 13.675 ms à la réception sur la longueur d'onde de 1552.52 nm. Donc, s'il y a eu une transmission par les couches supérieures durant ce temps, nous pouvons mesurer son impact sur le BER, découlant de la puissance variée, dans la communication. Le Tableau 4.4 montre le parcours partiel d'un message de la couche supérieure de type Ethernet dans la couche physique. Un changement du BER aurait été possible sur ce message s'il y avait eu une fluctuation de puissance durant son parcours.

Tableau 4.4 Transmission d'un paquet de type Ethernet traversant la couche physique par encapsulation et démontrant la séparation entre la couche physique et les couches supérieures

Temps (ms)	Module du message sortant	Message	Données et variables	Commentaire
15.000000	Contrôleur	Electronic Message: dataPacket	PacketType : Ethernet Frame PacketSize = 1500 octets	Envoi d'un paquet de type Ethernet au transmetteur (queue).
15.000300	Transmetteur	Photonic Message VTXStart	wavelength = 1533.47 Ethernet Frame (1500 octets)	Début du paquet (dans une encapsulation de <i>Photonic Message</i>) dans le domaine optique avec 0.3 μ s à cause du délai de modulation.
15.000300	Coupleur optique	Photonic Message VTXStart	wavelength = 1533.47 Ethernet Frame (1500 octets)	Début du paquet sortant du coupleur optique.
15.001500	Transmetteur	Photonic Message VTXStop	wavelength = 1533.47	Fin du paquet sortant du transmetteur.
15.001500	Coupleur optique	Photonic Message VTXStop	wavelength = 1533.47	Fin du paquet sortant du coupleur optique.
15.350300	Fibre optique 1 (70 km)	Photonic Message VTXStart	wavelength = 1533.47	Début du paquet sortant de la première fibre optique.
15.351500	Fibre optique 1 (70 km)	Photonic Message VTXStop	wavelength = 1533.47	Fin du paquet sortant de la première fibre optique.
15.350300	Amplificateur optique	Photonic Message VTXStart	wavelength = 1533.47	Début du paquet sortant de l'amplificateur optique.
15.351500	Amplificateur optique	Photonic Message VTXStop	wavelength = 1533.47	Fin du paquet sortant de l'amplificateur optique.
15.675300	Fibre optique 2 (65 km)	Photonic Message VTXStart	wavelength = 1533.47	Début du paquet sortant de la deuxième fibre optique.
15.676500	Fibre optique 2 (65 km)	Photonic Message VTXStop	wavelength = 1533.47	Fin du paquet sortant de la deuxième fibre optique.
15.676800	Récepteur	Electronic Message: dataPacket	wavelength = 1533.47 Ethernet Frame (1500 octets)	Transmission du paquet à la couche supérieure avec délai de démodulation de 0.3 μ s et enregistrement des statistiques de latences, de la qualité de la transmission, etc.

Le Tableau 4.5 montre les types de messages qui existent dans le simulateur pour toutes les communications électroniques. Lorsqu'un message est transmis dans la couche physique, il est encapsulé dans un message photonique.

Tableau 4.5 Type de message existant dans le simulateur pour toutes les communications électroniques

Paramètre	Utilité
TxRxCtrl	Messages entre le contrôleur des interfaces et les transmetteurs-récepteurs.
ControlePlaneInterface	Messages entre le contrôleur du nœud et les interfaces.
RSVPTE	Messages entre les nœuds pour faire réserver les ressources telles que l'assignation d'un chemin optique et encapsulés dans un message photonique. Utilise le protocole RSVP-TE de IETF.
LD	Messages entre les nœuds pour faire la découverte de la topologie et encapsulés dans un message photonique.

Finalement, nous présentons la communication entre le contrôleur des interfaces et les transmetteurs-récepteurs. Le Tableau 4.6 montre la structure des paquets entre le contrôleur des interfaces et les transmetteurs-récepteurs alors que le Tableau 4.7 présente le type de message entre le contrôleur des interfaces et les transmetteurs-récepteurs. Il est à noter que tous les messages entre les interfaces sont envoyés avec un délai minimal d'un cycle de processeur de 1 ns. Aussi, les paquets parcourant la couche physique sont 7 % plus longs à cause de l'utilisation du FEC.

Tableau 4.6 Structure des paquets entre le contrôleur des interfaces et les transmetteurs-récepteurs

Paramètre	Utilité
MsgType	Le type de message pour la communication entre le contrôleur des interfaces et les transmetteurs-récepteurs. Les valeurs sont celles du tableau suivant.
Data	Les valeurs de paramètres telles que la longueur d'onde, la puissance, etc.
Grant	Vrai ou faux, selon le résultat de la demande.

Tableau 4.7 Message entre le contrôleur des interfaces et les transmetteurs-récepteurs. Tous les messages sont envoyés avec un délai minimal d'un cycle de processeur de $1.0 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$ (clockRate_data)

Type de message		Signification
tx_turn_on_req	rx_turn_on_req	Demande du contrôleur NIF d'allumer le transmetteur ou le récepteur.
tx_turn_on_grant	rx_turn_on_grant	Réponse positive du transmetteur ou du récepteur à l'allumage envoyé, lorsqu'allumé (WarmupTime).
tx_turn_on_deny	rx_turn_on_deny	Réponse négative du transmetteur ou du récepteur à l'allumage envoyé après un cycle de processeur.
tx_setwavelength_req	rx_setwavelength_req	Demande du contrôleur NIF d'accorder le transmetteur ou le récepteur à la longueur spécifiée dans data.
tx_setwavelength_grant	rx_setwavelength_grant	Réponse positive du transmetteur ou du récepteur à l'accord de la longueur d'onde envoyé, lorsqu'accordé (TuningTime).
tx_setwavelength_deny	rx_setwavelength_deny	Réponse négative du transmetteur ou du récepteur à l'accord de la longueur d'onde envoyé après un cycle de processeur.
tx_setpower_req		Demande du contrôleur NIF d'ajuster le transmetteur à la puissance spécifiée dans data.
tx_setpower_grant		Réponse positive du transmetteur d'ajuster la puissance envoyée, lorsqu'ajustée (TuningTime).
tx_setpower_deny		Réponse négative du transmetteur d'ajuster la puissance envoyée après un cycle de processeur.
tx_open_shutter_req		Demande du contrôleur NIF d'ouvrir l'obturateur du transmetteur.
tx_open_shutter_grant		Réponse positive du transmetteur d'ouvrir l'obturateur.
tx_open_shutter_deny		Réponse négative du transmetteur d'ouvrir l'obturateur.
tx_close_shutter_req		Demande du contrôleur NIF de fermer l'obturateur du transmetteur.
tx_close_shutter_grant		Réponse positive du transmetteur de fermer l'obturateur.
tx_close_shutter_deny		Réponse négative du transmetteur de fermer l'obturateur.
	rx_getpower_req	Demande du contrôleur NIF d'avoir la puissance de réception.
	rx_getpower_grant	Réponse positive du récepteur avec la puissance spécifiée dans data.
	rx_getpower_deny	Réponse négative du récepteur d'avoir la puissance de réception.
	rx_getBER_req	Demande du contrôleur NIF d'avoir le taux d'erreurs sur les bits.
	rx_getBER_grant	Réponse positive du récepteur avec le taux d'erreurs sur les bits dans data.
	rx_getBER_deny	Réponse négative du récepteur d'avoir le taux d'erreurs sur les bits.
tx_stop_req	rx_stop_req	Demande du contrôleur NIF d'arrêter toute transmission ou toute réception.
tx_stop_grant	rx_stop_grant	Réponse positive d'arrêter toute transmission ou toute réception.
tx_stop_deny	rx_stop_deny	Réponse négative d'arrêter toute transmission ou toute réception.

4.3 Le plan de contrôle

L'architecture et la conception ayant été suffisamment définies précédemment, les réseaux sans filtre requièrent une attention particulière pour envisager l'élaboration d'un plan de contrôle. Le plan de contrôle a comme fonction de faire (Bernstein, Rajagopalan et Saha, 2004):

- la découverte des voisins (topologie);
- le routage;
- la signalisation;
- la gestion des ressources locales.

Un bon plan de contrôle essaie toujours de limiter la probabilité de blocage selon des contraintes déterminées. Il existe plusieurs types de blocage qu'il est possible de séparer en deux groupes selon qu'ils proviennent de la couche physique (niveau 0) ou de la capacité du réseau (niveau 1). Les principaux blocages à la couche physique sont dus principalement aux dégradations de la couche physique telles que définies au chapitre 3 tandis qu'au niveau du réseau, ils sont dus aux facteurs suivants:

- aucun chemin optique n'est disponible; dans le cas des réseaux sans filtre, ce blocage est impossible ces réseaux sont créés à ce qu'il y a pleine connectivité entre les nœuds;
- aucun canal n'est disponible pour établir la connexion;
- aucun transmetteur n'est disponible pour établir la connexion;
- aucun récepteur n'est disponible pour établir la connexion.

La probabilité de blocage pour chacune de ces possibilités est mesurée pour différents réseaux et ratio d'utilisation lorsque les simulations ont atteint leur état stationnaire. Les probabilités de blocage sont mesurées à la fois pour chacun des nœuds ainsi que pour le réseau en entier.

4.3.1 Initialisation

Chaque simulation, comme c'est le cas dans un nœud réel, commence par un statut d'initialisation: *STATUS_INIT_CONTROL*, que l'on peut exprimer par:

- initialisation de la base de données du contrôleur nodal;
- initialisation des équipements du nœud;
- mise en marche des interfaces de contrôle.

En premier lieu, lors de la création dans la base de données de contrôle du nœud, on suppose que le plan de contrôle connaît complètement la topologie logique entre les nœuds ainsi que toutes les interfaces à sa disposition. Cette topologie est différente de celle des arbres de fibre

optique. Spécifiquement, les nœuds connaissent l'adresse des nœuds et les ports auxquels ils sont connectés entre eux ensemble par des liens points à point. Ce sont des liens point à point comme il a été défini dans le chapitre précédent puisque le canal de contrôle est enlevé et ajouté à chaque port d'entrée et de sortie respectivement. La Figure 4.4 montre la connectivité du plan de contrôle dans le même réseau allemand à 17 nœuds qu'à la Figure 2.1.

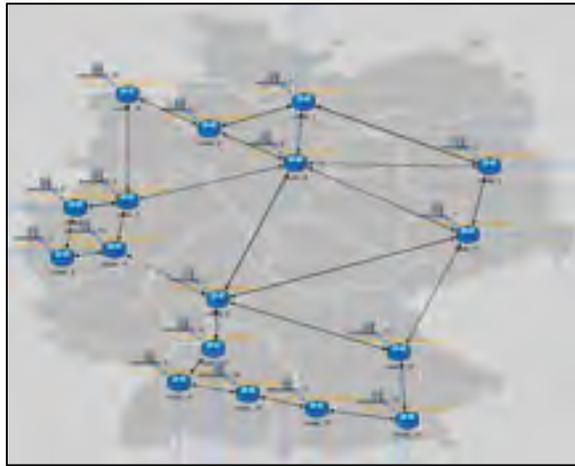


Figure 4.4 Connectivité point à point du plan de contrôle du réseau allemand à 17 nœuds dans le statut d'initialisation

La connaissance de cette topologie est déterminée par programmation dans OMNeT++ alors qu'en réalité elle peut être soit entrée à la main ou avec un mécanisme semblable à Ethernet pour en faire la découverte. C'est une solution très bien connue dans la littérature et implantée dans toutes les infrastructures, telles qu'Internet. Le contrôleur de chaque nœud détermine le chemin le plus court entre chaque paire de nœuds à l'aide de l'algorithme de Dijkstra selon l'implantation de (Cieutat et Binh, 2003) et en utilisant le nombre de sauts comme coefficient de pondération. Le plan de contrôle peut alors communiquer avec les autres nœuds à l'aide d'un protocole semblable à UDP. Il communique en envoyant un message au port correspondant. Ce message sera redirigé au nœud cible par les nœuds intermédiaires. Le protocole utilise l'entête de 48 octets correspondant à celui d'UDP IPv6 auquel on ne s'intéresse qu'à l'adresse source et à l'adresse destinataire ainsi que de la longueur de bits

permettant de modéliser les délais de transmission dus au débit binaire (155 Mb/s) ainsi que ceux dans la queue d'attente. Le contrôleur du nœud crée aussi une base de données pour la connectivité de ces transmetteurs-récepteurs et sur le port auquel ils sont attachés. Pour le moment, ils sont fixes, mais une modification de l'architecture permet des les avoir réassignés vers d'autres ports à l'aide de commutateur optique, augmentant ainsi la flexibilité de l'architecture à la demande de trafic. Aussi le contrôleur, garde la connaissance de l'adresse des transpondeurs, s'ils sont utilisés, prêts à transmettre ou à recevoir et celles des canaux assignés à ceux-ci.

L'initialisation des interfaces contrôle est ensuite effectuée: l'allumage des transmetteurs de contrôle (accord de la longueur d'onde et ouverture d'émission du laser, etc.) ainsi que la mise en attente des récepteurs de contrôle. Le contrôleur attend d'avoir reçu la confirmation de tous ces transmetteurs-récepteurs contrôles pour ensuite tomber dans le statut d'opération normale (NORMAL_OPERATION) permettant la découverte de la topologie. Le Tableau 4.7 montre les structures de paquets tandis que le Tableau 4.8, les types de messages pour les communications entre le contrôleur et les interfaces.

Tableau 4.8 Structure des paquets entre le contrôleur du nœud et les interfaces

Paramètre	Utilité
dest_port	Port destinataire de l'interface pour le paquet.
dest_interface	Interface destinataire au port correspondant pour le paquet.
CPIMsgType	Type de message entre le contrôleur du nœud et les interfaces d'où les valeurs sont celles du tableau suivant.
transceiver_type	L'interface est un transmetteur ou un récepteur.
lambda	Le canal correspondant à la longueur d'onde à accorder dans le transmetteur ou le récepteur.
power	La puissance à ajuster à la sortie du transmetteur.
request_status	Demande du statut de l'interface par le contrôleur du nœud.

Tableau 4.9 Types de message entre le contrôleur du nœud et les interfaces

Type de message	Utilité
set_interface_req	Demande du contrôleur du nœud à l'interface de s'ajuster au canal et de transmettre à la puissance donnée si elle est un transmetteur.
set_interface_grant	Réponse positive de l'interface à la demande du contrôleur du nœud de s'ajuster.
set_interface_deny	Réponse négative de l'interface à la demande du contrôleur du nœud de s'ajuster.
stop_interface_req	Demande du contrôleur du nœud à l'interface d'arrêter la transmission ou la réception.
stop_interface_grant	Réponse positive de l'interface à la demande du contrôleur d'arrêter la transmission ou la réception.
stop_interface_deny	Réponse négative de l'interface à la demande du contrôleur d'arrêter la transmission ou la réception.
interface_ready	Message provenant de l'interface pour aviser le contrôleur du nœud que celle-ci est prête à transmettre ou recevoir.

4.3.2 La découverte des voisins

Il existe deux statuts possibles pour la découverte des voisins. Le premier statut est le suivant: le réseau complet est mis en service et effectue la découverte. Ensuite, il passe au deuxième cas, où il est possible d'ajouter d'autres nœuds. Dans ce mémoire, nous nous penchons seulement sur le premier cas à la suite de l'initialisation des nœuds.

Le simulateur attend que tous les nœuds soient initialisés et soient dans les statuts d'opération normale avant de commencer la découverte des voisins par transparence dans le domaine optique. Un protocole simple peut coordonner le choix du nœud qui initie la découverte et choisir le prochain aux tours suivants, mais sans perte de généralité, nous laissons le simulateur faire, de façon globale, l'initialisation en commençant par un nœud déterminé de façon aléatoire. Une stratégie possible serait de faire la séquence en commençant par la plus petite adresse numérique du nœud, puis la suivante, etc. Ceci a comme effet d'établir un temps minimal pour faire la découverte de la topologie alors que, dans un protocole de coordination, il faudrait implanter un délai d'inactivité ou « timeout » (découlant de ce minimum) lors de la découverte dans les conditions données. On suppose aussi que chacun des nœuds a une horloge qui est synchronisée à une horloge atomique afin de déterminer les latences.

Le Tableau 4.10 montre la structure du paquet du protocole que l'on nomme LD pour *Link Discovery* alors que le Tableau 4.11 montre les types de message dans l'implantation de ce protocole.

Tableau 4.10 Structure des paquets du protocole LD pour faire la découverte de la topologie transparente. Les paquets ont une longueur totale de 91 octets

Paramètre	Longueur (octet)	Utilité
Entête UDP	48	Entête UDP qui inclut l'adresse source et l'adresse destinataire pour rediriger les messages.
GMsgType	1	Type de message du protocole LD impliqué dans la découverte de la topologie transparente dont les valeurs sont dans le tableau suivant.
Message Id	2	Identité du message pour suivre le traitement des demandes et des réponses.
Local_Node Id	16	Adresse du nœud source impliqué dans la découverte.
Local_PortID	2	Port optique du nœud source pour faire la découverte.
Remote_Node Id	16	Adresse du nœud dont le message de découverte est reçu.
Remote_PortID	2	Port optique du message de découverte reçu.
Triptime	2	Temps entre l'envoi et la réception du message de découverte (latence).
Checksum	2	Somme de contrôle pour assurer l'intégrité des messages de découverte en plus de celui d'UDP.

Lors de l'initialisation de la découverte de la topologie, le simulateur choisit un nœud de manière aléatoire que l'on dénomme le nœud initiant. Ce nœud envoie alors un message *DISCOVER_REQ* à tous les autres nœuds sur le canal contrôle. Ceux-ci seront acheminés au nœud destinataire par l'intermédiaire des routeurs sur le canal contrôle. À la réception de ce message et lorsqu'il est prêt à participer à la découverte (récepteur contrôle prêt à recevoir sur le canal de tonalité), le nœud envoie le message *DISCOVER_ACK* au nœud initial.

Tableau 4.11 Type de message du protocole LD impliqué dans la découverte de la topologie transparente

Type de message	Utilité
DISCOVER_REQ	Message envoyé par le nœud duquel c'est le tour de faire la demande aux autres nœuds de participer à la découverte de la topologie transparente.
DISCOVER_ACK	Réponse positive envoyée au nœud demandeur de participer à la découverte.
DISCOVER_NACK	Réponse négative envoyée au nœud demandeur de ne pas participer à la découverte.
TRACEMONITOR	Message envoyé sur le canal de découverte avec l'identité du nœud source et le port optique envoyé.
TRACEMONITOR_ACK	Message retourné sur le canal contrôle avec l'identité du nœud à la réception et le port optique reçu
TRACEMONITOR_NACK	Message retourné sur le canal contrôle s'il y a un problème.
TRACEMONITOR_UPDATES	Message envoyé sur le canal contrôle pour disséminer la nouvelle connaissance de la topologie optique transparente aux autres nœuds du réseau.

S'il ne peut pas participer, il envoie le message *DISCOVER_NACK* à ce nœud. Le nœud initiant attend les réponses de tous les autres nœuds avant de poursuivre. Lorsque toutes les réponses affirmatives sont reçues, le nœud initiant accorde tous ces transmetteurs de contrôle sur le canal de tonalité. Une fois tous les transmetteurs accordés, un message *TRACEMONITOR* est envoyé à chacun des ports optiques sur le canal de tonalité avec une adresse multideestination dans la structure de paquets du Tableau 4.10 et contenant l'adresse d'origine (du nœud initiant), le port optique d'origine et l'heure d'envoi. Les transmetteurs sont réaccordés au canal de contrôle par la suite. Les messages avec le port optique correspondant seront reçus par les ports d'entrée aux nœuds correspondants du chemin optique. Les nœuds participants ajoutent la correspondance des ports optiques avec le nœud initiant dans leur base de données. Ces nœuds participants renvoient le message *TRACEMONITOR*, sous forme de *TRACEMONITOR_ACK*, sur le canal de contrôle, au nœud initial et en ajoutent l'adresse des nœuds et les correspondances des ports optiques entre eux ainsi que la différence entre le temps à la réception et l'envoi (la latence). En cas de problèmes dans la communication durant la découverte, un message *TRACEMONITOR_NACK* est défini pour être envoyé. Les nœuds participants se remettent dans le statut de recevoir sur le canal contrôle. Le nœud initiant collecte toutes les réponses pour créer sa base de données de la topologie et diffuse l'information à tout autre nœud dans les réseaux avec le message *TRACEMONITOR_UPDATES* sur le canal de contrôle. Le processus est répété pour les nœuds restants (choisis aléatoirement par le simulateur) créant

ainsi la connaissance de la topologie complète à chacun des nœuds dans le réseau, lorsque terminé. La Figure 4.5 montre le réseau allemand à 17 nœuds en train de faire la découverte de sa topologie optique transparente. Le Tableau A.1 de l'annexe montre la base de données résultant de cette découverte de la topologie.

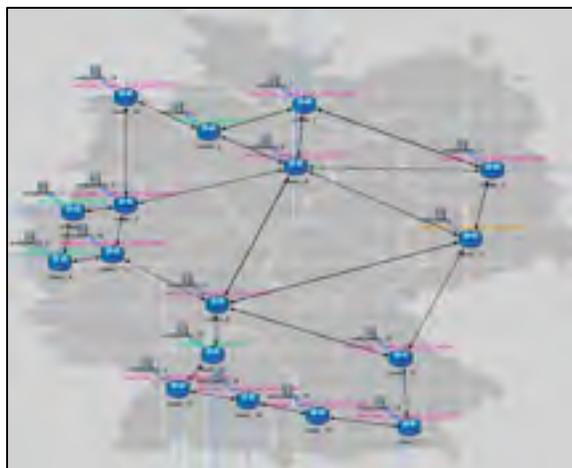


Figure 4.5 Le réseau allemand à 17 nœuds en train de faire la découverte de sa topologie optique transparente. C'est au tour du nœud 11 de continuer la découverte de la topologie transparente

4.3.3 Signalisation, routage et gestion des ressources locales

Le signalisation pour la gestion des ressources se fait à l'aide du protocole *Resource Reservation Protocol — Traffic Engineering* (RSVP-TE), un standard développé par à l'Internet Engineering Task Force (IETF) dont les détails sont dans le RFC 3209 (Li et al., 2001).

Dans le simulateur, nous utilisons un sous-ensemble de ce protocole (voir Tableau 4.12, Tableau 4.13 et Tableau 4.14) pour coordonner l'assignation de longueur d'onde selon la demande de trafic. L'implantation du protocole utilisé est une dérivation du code de (Cieutat

et Binh, 2003), adapté pour les réseaux sans filtre. Comme nous pouvons voir aux figures 4.4 et 4.5, chaque routeur est connecté à un système d'extrémité (end system) dont les demandes de connexion peuvent provenir des utilisateurs du réseau. Dans ce contexte-ci, un utilisateur peut être, comme exemple, un fournisseur d'accès Internet (ISP), une entreprise nécessitant une grande capacité de réseau ou encore une intuition financière, etc. Les demandes sont à une granularité d'une longueur d'onde et les routeurs déterminent le chemin approprié à l'aide d'un élément de calcul chemin ou Path Computation Element (PCE) en anglais. Dans ce mémoire, on considère que tous les chemins se font directement dans le domaine optique, avec aucune commutation possible ni régénération dans le domaine électronique. Cette contrainte peut être relaxée dans le futur si l'on veut un réseau hybride incluant des ROADMs dans la solution de réseau. L'utilisation de régénération électrique aurait comme résultat de diminuer l'efficacité en longueur d'onde (si le canal n'est pas bloqué) et ne semble utile que dans le cas d'une frontière entre sous-réseaux distincts.

Tableau 4.12 Structure des paquets du RSVP-TE pour faire la gestion des ressources. Les paquets ont une longueur totale de 133 octets

Paramètre	Longueur (octet)	Utilité
Entête UDP	48	Entête UDP qui inclut l'adresse source et l'adresse destinataire pour diriger les messages.
Vers + Flags	1	Version du protocole et indicateurs. Fait partie de l'entête commune de RSVP-TE.
GMsgType	1	Type de message RSVP-TE dont les valeurs sont dans le tableau suivant.
Send TTL	1	Durée de vie du paquet. Fait partie de l'entête commune de RSVP-TE.
RSVP_length	2	Longueur du paquet RSVP. Fait partie de l'entête commune de RSVP-TE.
RSVP Checksum + Reserved	3	Somme de contrôle pour assurer l'intégrité des paquets et espace additionnel réservé. Fait partie de l'entête commune de RSVP-TE.
Message_Id	8	Identité du message pour suivre le traitement des demandes et des réponses.
lambda	2	Canal correspondant à la longueur d'onde pour établir les connexions.
tree	2	Arbre de fibre optique pour établir la connexion.
srcNode	16	Adresse source du nœud demandant la ressource.
dstNode	16	Adresse destinataire du nœud à la demande de la ressource.
beforeNodeAddress	16	Adresse du dernier voisin direct au canal de contrôle que le paquet doit transiger avant d'arriver au nœud destinataire impliqué dans la demande.
neighbourAddress	16	Adresse du voisin direct au canal contrôle que le paquet doit transiger au saut prochain pour aller au nœud destinataire impliqué dans la demande.
resvconf_Type	1	Type de réponse avec la raison ou le statut à la demande de la ressource.

Tableau 4.13 Types de message du protocole RSVP-TE pour faire la gestion des ressources

Type de message	Utilité
PATH	Demande d'un système d'extrémité d'établir une connexion avec un autre système d'extrémité.
RESV	Message envoyé à tous les nœuds partageant le même arbre de fibre optique afin de réserver le canal. Le nœud destinataire tente aussi de réserver un récepteur.
PATHERR	Pour signaler une erreur dans l'établissement d'une connexion optique. Non utilisé présentement par le simulateur.
PATHTEAR	Message envoyé à tous les nœuds partageant le même arbre de fibre optique pour enlever la réservation des canaux et du récepteur s'il est impossible de faire la réservation ou encore, à la terminaison d'une connexion déjà établie.
RESVCONF	Réponse envoyée au nœud source pour confirmer la réservation ou l'impossibilité de faire celle-ci. L'une des réponses du tableau suivant est envoyée selon le cas.
SREFRESH	Message envoyé à tous les nœuds du réseau pour informer qu'un canal n'est présentement plus disponible. Envoyé lorsqu'une réservation qui a été tentée sur le canal est présentement réservée dans un autre nœud évitant ainsi une collision. Sert à resynchroniser les bases de données sur la disponibilité des canaux.

Tableau 4.14 Réponses possibles dans l'établissement d'une connexion optique

Type de message	Utilité
LAMBDA_AND_INTERFACE_AVAILABLE	Réponse indiquant qu'une interface et un canal sont disponibles pour satisfaire la demande.
LAMBDA_UNAVAILABLE	Réponse indiquant qu'aucun canal n'est disponible pour satisfaire la demande.
RECEIVER_UNAVAILABLE	Réponse indiquant qu'aucun récepteur n'est disponible pour satisfaire la demande.
TRANSMITTER_UNAVAILABLE	Réponse indiquant qu'aucun transmetteur n'est disponible pour satisfaire la demande.
TRANSCIEVER_READY	Message envoyé pour indiquer que le transmetteur ou le récepteur est prêt pour transmettre ou recevoir respectivement.
LINK_ESTABLISHED	Message envoyé lorsque le lien est établi.

Dans le texte qui suit, le fonctionnement du protocole de signalisation pour établir les connexions sera expliqué.

Une demande d'un système d'extrémité pour une connexion avec un deuxième système d'extrémité est envoyée au routeur connecté au système d'extrémité demandant en utilisant un message RSVP-TE de type *PATH*. Le PCE du routeur regarde, dans sa base de données, les chemins possibles entre les deux systèmes d'extrémité. Il choisit, en premier, un chemin qui minimise une des métriques choisies à la section 4.3.4 à l'aide de *Open Shortest Path First* (OSPF). Une fois le candidat déterminé, une vérification de la disponibilité d'un transmetteur ainsi que d'un canal, selon les critères de la section 4.3.5, est effectuée. Si un transmetteur ou

un canal n'est pas disponible, le chemin suivant qui minimise la métrique est considéré et cela est répété jusqu'à ce qu'il n'y ait plus de chemin possible ou jusqu'à ce qu'un chemin soit trouvé. Si aucun chemin n'est possible, un message *RESVCONF* avec type *TRANSMITTER_UNAVAILABLE* ou *LAMBDA_UNAVAILABLE* dépendamment de la raison du dernier chemin investigué est envoyé au système d'extrémité demandant. Le système ne retente pas la connexion modélisant une queue sans attente dont les demandes sont écartées. Le cas avec une queue avec un arriéré de travail sera possiblement étudié dans le futur.

Dans le cas où un chemin avec la disponibilité d'un transmetteur et d'un canal satisfaisant la qualité de services existe, le nœud initiant réserve le transmetteur et le canal dans sa base de données locale. Il envoie un message *RESV* sur le canal contrôle à tous les autres nœuds partageant le même arbre de fibre optique du chemin choisi. Ce nœud tient à jour une table de routage contenant les connexions établies et celles en demande. Un compteur pour compter le nombre de réponses restantes des autres nœuds ainsi qu'un numéro d'identification de la demande existent dans cette table. Le nœud attend toutes les réponses des autres nœuds pour ensuite les traiter.

Un nœud qui reçoit un message *RESV* et qui n'est pas le *destinataire* du système d'extrémité vérifie s'il a eu une demande par son système d'extrémité dont lequel il aurait déjà réservé ce canal. Cette condition est possible à cause des latences et du fait que plusieurs demandes à la fois peuvent indépendamment tenter de réserver le même canal. Si le canal est disponible au nœud, il envoie le message *RESVCONF* avec *LAMBDA_AND_INTERFACE_AVAILABLE* et réserve le canal sinon, il envoie le message *RESVCONF* avec *LAMBDA_UNAVAILABLE*. Le nœud qui reçoit la demande sur un canal qu'il a déjà réservé envoie un message *SREFRESH* à tous les nœuds du réseau pour informer de la non-disponibilité du canal sur l'arbre et pour resynchroniser les bases de données. De son côté, le nœud qui est le destinataire, en plus de vérifier la disponibilité du canal, vérifie si un récepteur est disponible. Si c'est le cas, il envoie *LAMBDA_AND_INTERFACE_AVAILABLE* et commence l'accord de

son récepteur au canal demandé. Sinon, il envoie le message *RESVCONF* avec *RECEIVER_UNAVAILABLE* ou *LAMBDA_UNAVAILABLE*, si c'est le cas.

Le nœud initiant la demande attend les réponses des autres nœuds impliqués. S'il y a une impossibilité de satisfaire la demande, il envoie à tous ces nœuds un message *PATHTEAR* pour libérer les ressources. Si le nœud reçoit tous les messages *LAMBDA_AND_INTERFACE_AVAILABLE* des nœuds participants, la connexion peut alors être établie. Le nœud commence alors l'accord de son transmetteur et il attend le message *RESVCONF* de type *TRANSCEIVER_READY* de la part du nœud destinataire et qui sera envoyé lorsque son récepteur sera prêt à recevoir. Une fois le transmetteur accordé et le message reçu, le lien est établi et la communication entre les deux systèmes d'extrémité peut débuter. Le simulateur conserve les statistiques concernant la performance du plan de contrôle, tant en termes de temps d'établir les connexions ainsi que les causes d'échec de connexion. À titre d'exemple, nous montrons, dans le Tableau 4.15, un instant donné de table de routage au nœud 2 du réseau allemand à 17 nœuds.

Tableau 4.15 Exemple de table de routage à un instant donné dans le nœud 2

Nœud d'origine	Nœud Destinataire	Port optique d'origine	Port optique destinataire	Interface	Arbre de fibre	Canal assigné	Identité de la demande de routage	Réponses restantes	Interface correspondante prête
7	2	0	1	1	8	71	1	0	S.O.
2	11	2	2	2	5	15	13	0	Vrai
5	2	0	0	3	8	33	12	0	S.O.
8	2	5	0	9	8	10	24	0	S.O.
1	2	1	0	1	8	20	37	0	S.O.
2	10	0	1	2	8	43	38	0	Vrai
5	2	0	0	7	8	34	24	0	S.O.
2	4	0	1	4	8	44	40	0	Vrai
5	2	0	0	8	8	65	29	0	S.O.
2	10	0	1	1	8	28	44	0	Vrai
6	2	0	0	2	8	40	36	0	S.O.
2	8	2	0	1	5	42	45	0	Vrai
8	2	0	2	1	5	3	42	0	S.O.
2	10	0	1	3	8	12	46	0	Vrai
6	2	0	0	4	8	75	37	0	S.O.
14	2	1	0	5	8	76	28	0	S.O.
2	6	0	0	5	8	85	47	7	Faux

4.3.4 *Open Shortest Path First (OSPF)*

Pour choisir le chemin optique et pour satisfaire une connexion, nous pouvons utiliser l'une des métriques suivantes :

- le nombre de sauts minimaux s'il y a régénération électrique ou commutation optique;
- la distance ou latence minimale;
- nombre de canaux disponibles et nombre total de canaux (TAW et TAW2);
- maximise l'OSNR selon la charge des amplificateurs.

La détermination du minimum qui satisfait la métrique de contraintes utilisées se fait à l'aide de l'algorithme de Dijkstra. Dans le cas de pleine transparence optique, comme c'est le cas dans le réseau sans filtre avec aucune régénération et aucune commutation optique active, nous sommes réduits au choix banal de la valeur minimale de la métrique de contraintes entre les différents chemins possibles. Le nombre de chemins possibles est égal au nombre d'arbres de fibres optiques reliant les deux nœuds.

La métrique de TAW correspond à la charge assignée dans un lien et se définit par (Cieutat et Binh, 2003):

$$w_{i,j} = 1 - \frac{\lambda_{i,j}^a}{\lambda_{i,j}^T}, \quad \forall (i,j) \in E \quad (4.14)$$

où $\lambda_{i,j}^a$ est le nombre de canaux encore disponibles dans le lien (i,j) et $\lambda_{i,j}^T$ est le nombre total possible de canaux dans le lien. La métrique améliorée de TAW2 se définit par (Cieutat et Binh, 2003):

$$w_{i,j} = -\log \left[1 - \left(1 - \frac{\lambda_{i,j}^a}{\lambda_{i,j}^T} \right)^{\lambda_{i,j}^a} \right], \quad \forall (i,j) \in E \quad (4.15)$$

Les deux métriques TAW et TAW2 tentent de distribuer la charge des canaux entre les chemins possibles ou les arbres de fibres optiques dans le cas de réseau sans filtre. Ces métriques minimisent la probabilité de blocage dû au manque de longueur d'onde.

4.3.5 Assignment des longueurs d'onde

Actuellement, un canal correspondant à une longueur d'onde est choisi de façon aléatoire. Mais, d'autres schèmes sont possibles et c'est le PCE qui est responsable de les choisir. Le choix peut se faire comme suivant :

- de façon aléatoire;
- le premier canal disponible;
- selon les limitations de la couche physique.

Une bonne stratégie du PCE est de choisir les meilleurs canaux pour les plus longues distances occasionnant plus de dégradations telles que l'OSNR et les moins bons canaux pour les courtes distances. L'utilisation de l'assignation aléatoire ne sert donc que d'un point de référence afin d'évaluer la performance du PCE avec différentes topologies et demandes de trafic dynamique.

Dans le prochain chapitre, nous démontrerons des résultats utilisant ce plan de contrôle sur différentes topologies pour en déduire nos conclusions quant à son influence.

CHAPITRE 5

RÉSULTATS DES SIMULATIONS

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats des simulations obtenues avec le simulateur de plan de contrôle et dont nous avons présenté le fonctionnement ainsi que l'implantation dans les chapitres précédents. Deux scénarios différents sont étudiés en détail à partir du réseau allemand à 7 nœuds. Dans le premier cas, c'est l'étude d'une solution sans filtre en fonction de l'évolution du trafic (section 5.1.1). Alors que dans le deuxième cas, c'est une analyse de performance pour plusieurs solutions sans filtre d'un même réseau en fonction du trafic (section 5.1.2).

5.1 Étude du réseau allemand 7 nœuds

Les simulations présentées dans cette étude proviennent de la topologie du réseau allemand à 7 nœuds. La Figure 5.1 expose une solution composée de trois arbres de fibres optiques avec un ratio de protection de 71 %.

5.1.1 Étude du réseau allemand à 7 nœuds en fonction de la matrice de trafic

La présente étude est faite sur le réseau allemand à 7 nœuds (Figure 5.1) tel que publié dans la revue scientifique *Journal of Optical Communications and Networking* (JOCN) (Archambault et al., 2010) et dont on fait varier la matrice de trafic unitaire de respectivement 1, 2, 4, 5, 6, 8 et 12 multipliant cette matrice unitaire. Cette procédure permet de faire une étude du réseau allemand à 7 nœuds en fonction de la matrice de trafic. Le Tableau 5.1 montre les composantes nécessaires pour construire ce réseau avec la dépendance du multiple de la matrice de trafic unitaire. Aussi, on aperçoit, dans la dernière rangée, le coût approximatif et spéculatif de chacune des composantes utilisées pour le calcul du coût total des réseaux.

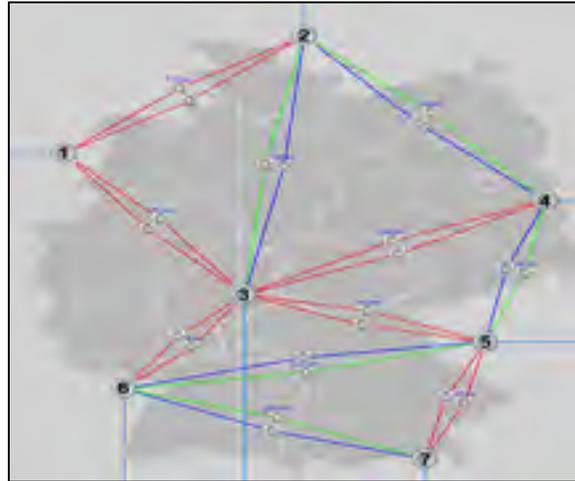


Figure 5.1 Solution sans filtre du réseau JOCN allemand à 7 nœuds composée de 3 arbres de fibres optiques avec un ratio de protection de 71 %

Tableau 5.1 Nombre de composants photoniques formant les réseaux allemands JOCN 7 en fonction du multiple de la matrice de trafic unitaire de 1 à 12. La dernière rangée correspond au coût approximatif de chacune des composantes

Matrice de Trafic	Récepteur (Contrôle)	Récepteur (Donnés)	Transmetteur (Contrôle)	Transmetteur (Donnés)	Coupleur (Detector)	Coupleur (Drop)	Coupleur (FanIn)	Coupleur (FanOut)	Coupleur (Transmitter)	Amplificateur (LineAmp)	Amplificateur (FanIn)	Amplificateur (Transmitter)	Amplificateur (Detector)	Amplificateur (FanOut)
1	22	42	22	42	42	16	28	12	42	74	16	22	22	4
2	22	84	22	84	84	16	28	12	84	74	16	22	22	4
3	22	126	22	126	126	16	28	12	126	74	16	22	22	4
4	22	168	22	168	168	16	28	12	168	74	16	22	22	4
5	22	210	22	210	210	16	28	12	210	74	16	22	22	4
6	22	252	22	252	252	16	28	12	252	74	16	22	22	4
7	22	294	22	294	294	16	28	12	294	74	16	22	22	4
8	22	336	22	336	336	16	28	12	336	74	16	22	22	4
9	22	378	22	378	378	16	28	12	378	74	16	22	22	4
10	22	420	22	420	420	16	28	12	420	74	16	22	22	4
11	22	462	22	462	462	16	28	12	462	74	16	22	22	4
12	22	504	22	504	504	16	28	12	504	74	16	22	22	4
Coût composante	\$1000	\$10000	\$1000	\$10000	\$200	\$200	\$200	\$200	\$200	\$10000	\$2000	\$2000	\$2000	\$2000

Comme mentionné dans le chapitre précédent, les taux d'arrivée et de départ des connexions pour le trafic de toutes les simulations de ce mémoire, suivent une distribution de Poisson. Dans cette étude, le taux des départs μ est fixé à $2.3 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ donnant un temps de service moyen d'environ 12.1 heures. Quant au taux des arrivées λ , il varie entre $2.3 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ et $3.793 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ en sauts de $5.8 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$, donnant un temps moyen entre les arrivées débutant à 12.1 heures jusqu'à 4.4 minutes avec un saut débutant à 8.6 heures et se terminant à 4

secondes. Le ratio d'utilisation ρ est donc varié de 1.0 à 164.9 (selon la définition de l'équation (4.1)) en sauts de 2.5 Erlang. Il est indépendant de μ et λ et dépendant seulement de leur ratio. L'indépendance est valide tant que leurs réciproques est beaucoup plus grandes que le temps à établir les connections (temps d'accord, taux binaire du canal, latence de propagation, etc.).

Dans tous les cas, l'analyse statistique est faite en régime permanent, excluant donc les données avant la période de stabilisation à l'amorçage et la période de terminaisons des demandes. Pour cette étude, en fonction de la matrice de trafic, un total de 4312 demandes ont été effectuées dans le réseau pour chacun des ratios d'utilisation. Dans ce cas-ci, l'intérêt est de pouvoir comparer l'influence de la capacité du réseau à la conception avec le nombre de demandes. Pour avoir des statistiques précises du réseau, un nombre minimal de demandes serait de 25872, mais le temps de calcul nécessaire a été une contrainte. La métrique choisie est celle qui minimise les latences et l'assignation des longueurs d'onde se fait de façon aléatoire.

Les solutions sans filtre statiques, telles que celles obtenues dans les travaux précédents (Archambault et al., 2010), pour les douze multiples de matrices de trafic avec le ratio d'utilisation moyen des canaux sur le total des arbres de fibres optiques (`networktreeUtil`), tel que défini par l'équation (4.9), sont exposées dans le Tableau 5.2. Le nombre de demandes est le maximum théorique de capacité du réseau dans un contexte statique où chaque demande est assignée.

Tableau 5.2 Solutions sans filtre statiques pour les douze multiples de matrice de trafic unitaire

Matrice de Trafic	Nombre de demandes (Trafic maximal)	Nombre de lambda	Nombre de demandes par arbres de fibres optiques			Ratio d'utilisation moyenne des canaux (networktreeUtil)
			Arbre de fibres 1	Arbre de fibres 2	Arbre de fibres 3	
1	42	13	6	8	28	0.16
2	84	26	12	16	56	0.32
3	126	39	18	24	84	0.48
4	168	52	24	32	112	0.64
5	210	65	30	40	140	0.80
6	252	78	36	48	168	0.95
7	294	91	42	56	196	1.11
8	336	104	48	64	224	1.27
9	378	117	54	72	252	1.43
10	420	130	60	80	280	1.59
11	462	143	66	88	308	1.75
12	504	156	72	96	336	1.91

Tableau 5.3 Le nombre d'arbres de fibres optiques et le degré à chacun des nœuds correspondant au réseau

Nœud	Nombre d'arbres de fibres optiques	Degré
1	1	2
2	3	3
3	3	5
4	3	3
5	3	4
6	3	3
7	3	2

La Figure 5.2 montre le trafic sur le réseau moyen dans le régime permanent en fonction du ratio d'utilisation pour différents multiples de matrice de trafic unitaire (Trafic 1, 2, 4, 5, 6, et 12). Les barres représentent les écarts types des moyennes pour chaque multiple. L'ajustement analytique des courbes est à partir de l'équation :

$$y = A(1 - e^{-R_0 \rho}) \quad (5.1)$$

où A correspond au trafic maximal en saturation du réseau et R_0 correspond au ratio d'utilisation à la demi-charge de trafic maximal en saturation.

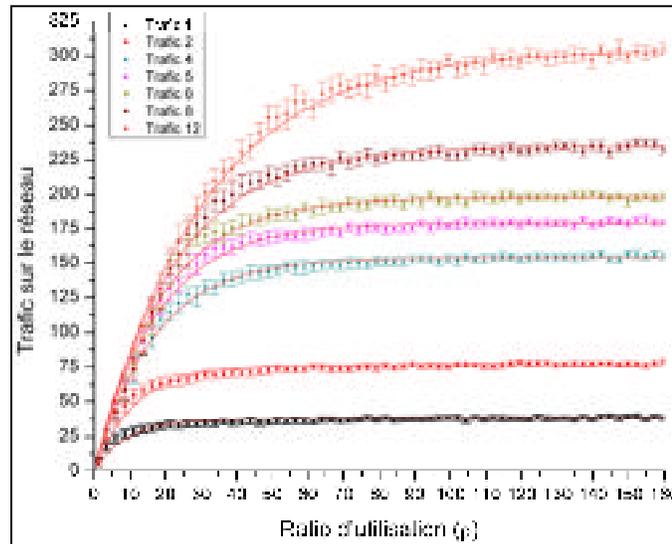


Figure 5.2 Moyenne du trafic en fonction du ratio d'utilisation pour différents multiples de matrice de trafic unitaire

La Figure 5.3 montre respectivement le paramètre A (gauche) et R_0 (droite) en fonction du multiple de la matrice de trafic unitaire. La partie gauche de la Figure 5.4 montre les coûts du réseau selon la conception avec les différents multiples de la matrice de trafic unitaire alors que la partie droite montre encore les coûts mais, cette fois-ci, en fonction du trafic maximal à la saturation, c'est à dire, le paramètre A . Les coûts sont déterminés à partir des valeurs du Tableau 5.1. Finalement, la Figure 5.5 montre la valeur théorique de la capacité maximale du réseau suivant une distribution statistique de Poisson. Cette valeur est limitée par le nombre de transmetteurs disponibles. Les figures ainsi que les résultats des solutions statiques supportent le fait que, financièrement, cette solution sans filtre du réseau JOCN allemand à 7 nœuds est limité à une matrice de trafic d'environ six fois plus que celle unitaire, car il y a épuisement des canaux disponibles dans un des arbres de fibres optiques. Ce facteur six provient du nombre maximal de longueurs d'onde (λ) nécessaires afin de

satisfaire la solution sans filtre statique. Avec une matrice de trafic six fois unitaire, elle nécessite 78 longueurs d'onde alors que celle de sept fois unitaire nécessite 91 longueurs d'onde (voir Tableau 5.2). Ceci sert de point de départ de comparaison pour l'étude de la topologie des arbres de fibre optiques de ce réseau à la section 5.1.2 qui utilise cette matrice de trafic six fois unitaire.

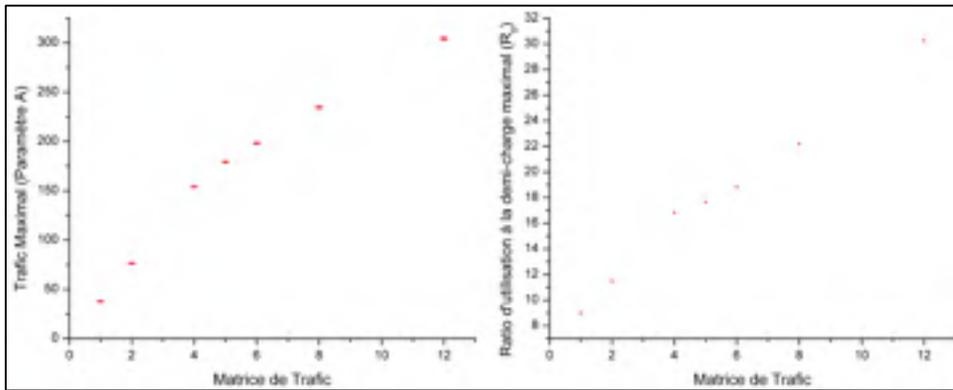


Figure 5.3 Trafic maximal (paramètre A de l'ajustement analytique) à gauche en fonction du multiple de la matrice de trafic unitaire et le ratio d'utilisation à la demi-charge de trafic maximale (Paramètre R0 de l'ajustement analytique) à droite en fonction du multiple de la matrice de trafic unitaire

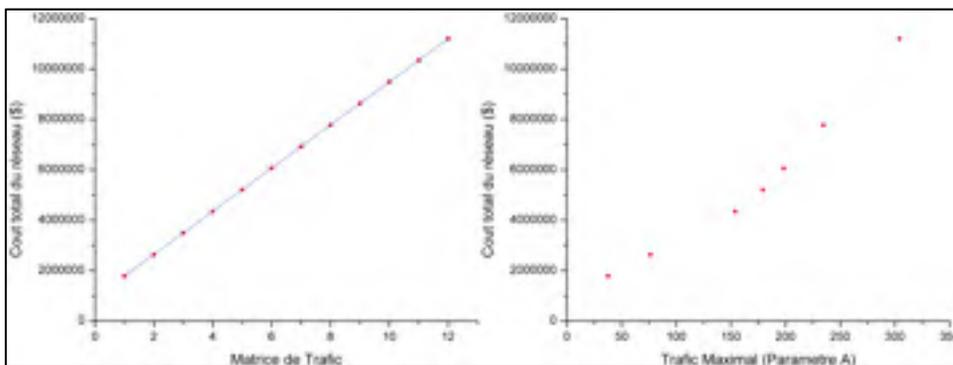


Figure 5.4 Coût total du réseau conçu en fonction du multiple de la matrice de trafic unitaire (gauche) et le coût total du réseau en fonction de la moyenne du trafic maximal dynamique qu'il peut supporter (droite). Le trafic est relié au multiple de la matrice de trafic unitaire lors de la conception

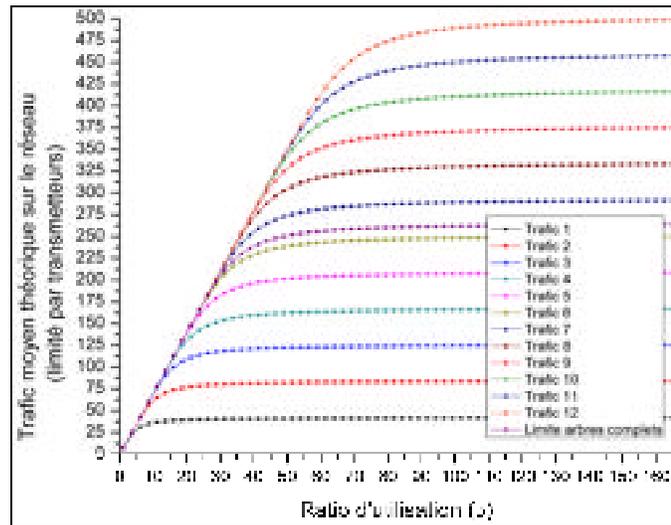


Figure 5.5 Trafic théorique moyen sur le réseau, lorsque limité par le nombre de transmetteurs en fonction du ratio d'utilisation et du multiple de matrice de trafic. La limite des arbres de fibres optiques complets y est aussi montrée (mauve)

La métrique utilisée pour choisir le chemin est celle qui minimise les latences. À partir d'un certain seuil du ratio d'utilisation, le chemin qui minimise la latence n'est potentiellement plus disponible, soit à cause qu'aucun transmetteur, récepteur ou canal n'est disponible. Cette connexion est forcée de passer sur un autre arbre de fibres optiques (analogue à une transition de phase) et les latences dans le réseau augmentent. La Figure 5.6 montre cette transition pour les différents multiples de matrice unitaire de trafic.

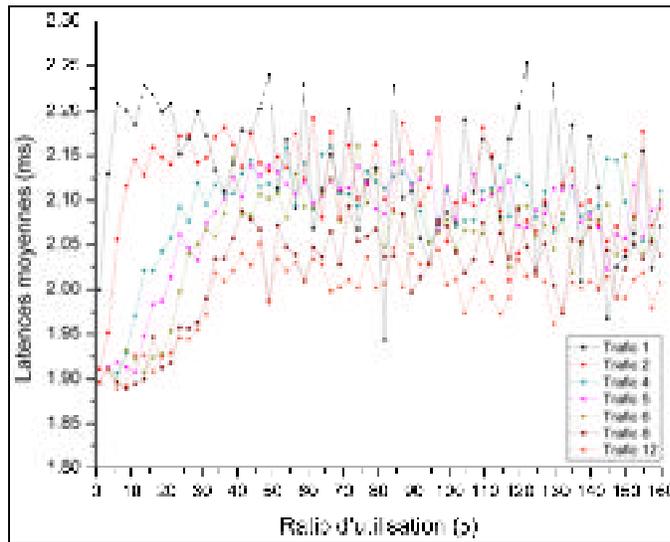


Figure 5.6 Latence moyenne des connexions établies en fonction du ratio d'utilisation et du multiple de matrice de trafic unitaire

Les figures 5.7-5.10 montrent respectivement, la probabilité de blocage total, la probabilité de blocage par non disponibilité de transmetteur, la probabilité de blocage par non disponibilité de récepteur, et finalement la probabilité de blocage par non disponibilité de canal. Ces probabilités de blocage sont données à chacun des nœuds ainsi que pour la moyenne de l'ensemble du réseau en fonction du ratio d'utilisation et de l'évolution de la quantité de trafic (en termes de multiples d'une matrice uniforme). Comme il est attendu, plus le réseau a un grand nombre de transmetteurs et de récepteurs, plus la probabilité de blocage est faible, jusqu'à la limite du nombre de canaux permis dans la fibre optique. Aussi, plus grand est le nombre d'arbres de fibres optiques accessibles au nœud et plus grand est son degré, plus la probabilité de blocage est faible, permettant une plus grande résilience aux fluctuations du trafic dans le réseau.

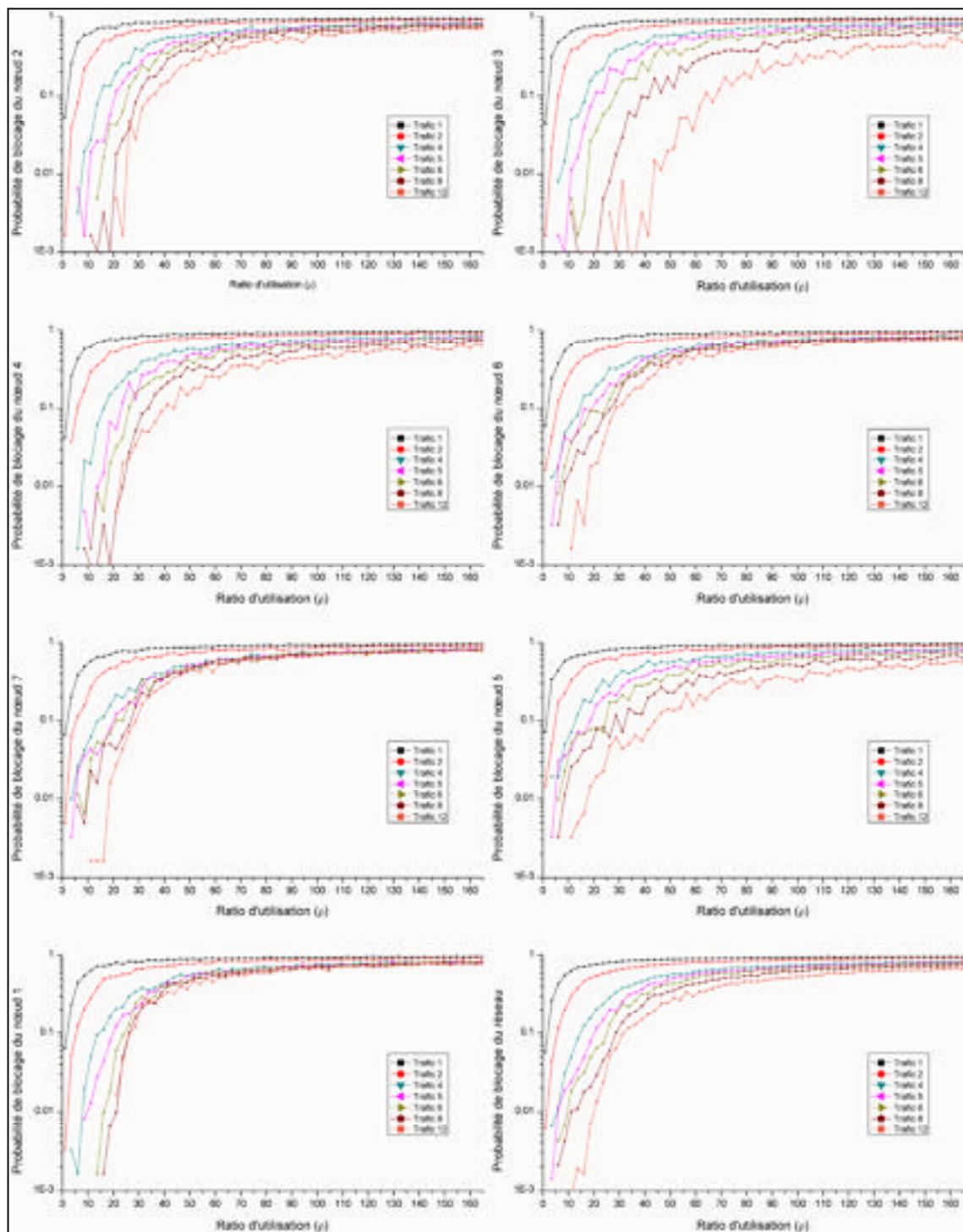


Figure 5.7 Probabilité de blocage total (incluant la probabilité de blocage de transmetteur, de récepteur et de canal non disponibles) de chacun des nœuds et du réseau entier en fonction du ratio d'utilisation pour chacun des multiples d'une matrice de trafic unitaire

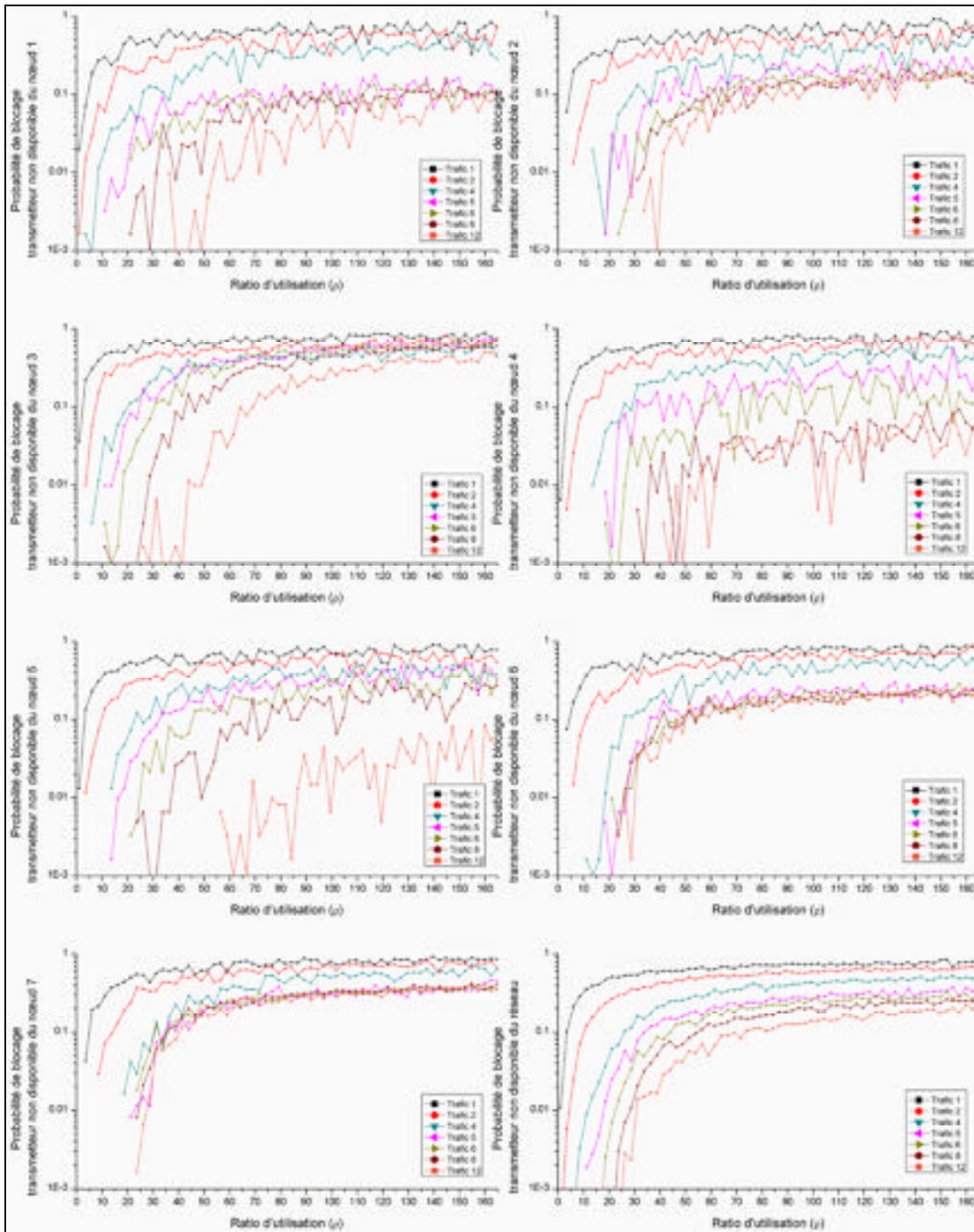


Figure 5.8 Probabilité de blocage par non disponibilité de transmetteur de chacun des nœuds et du réseau entier en fonction du ratio d'utilisation pour chacun des multiples d'une matrice de trafic unitaire

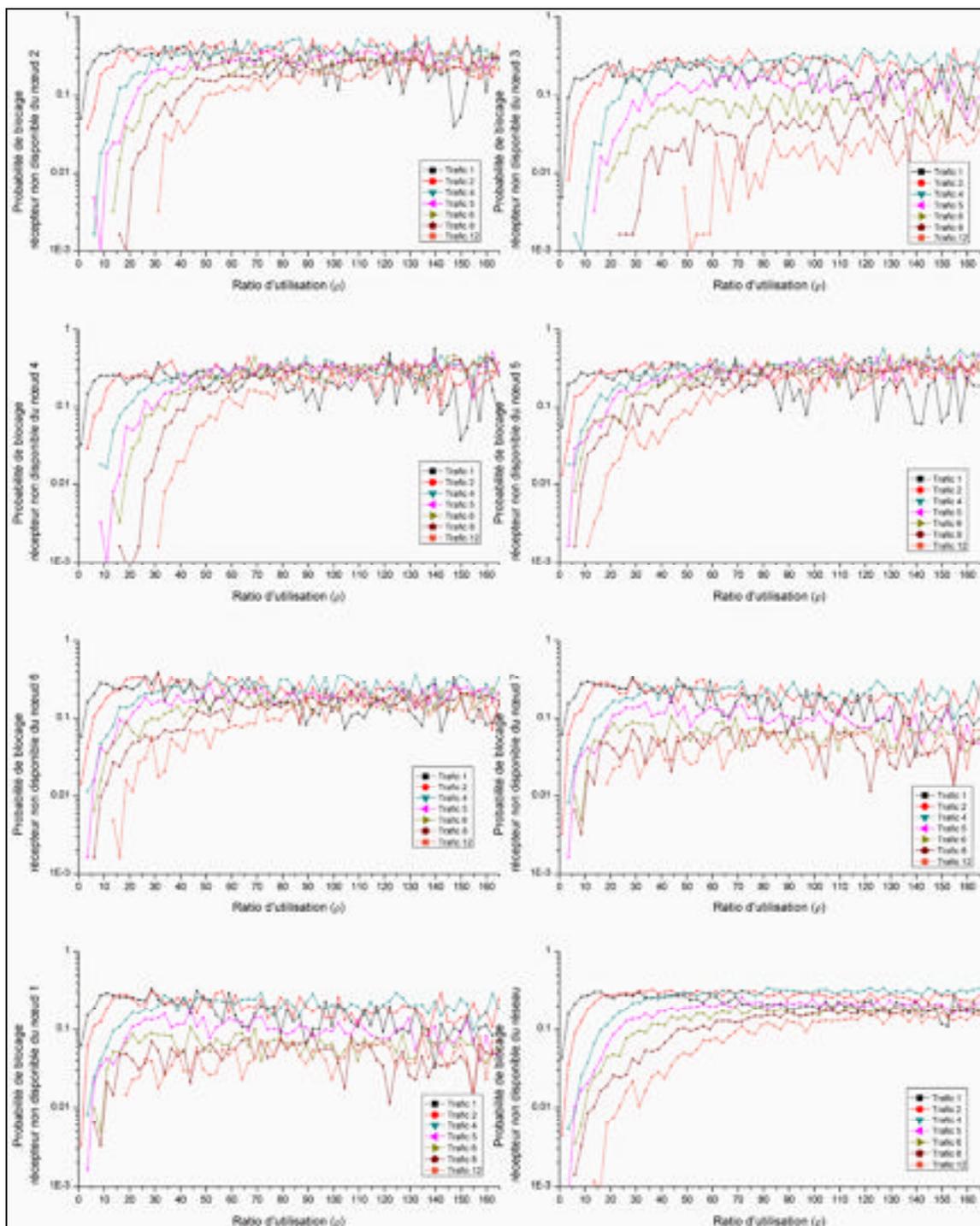


Figure 5.9 Probabilité de blocage par non disponibilité de récepteur de chacun des nœuds et du réseau entier en fonction du ratio d'utilisation pour chacun des multiples d'une matrice de trafic unitaire

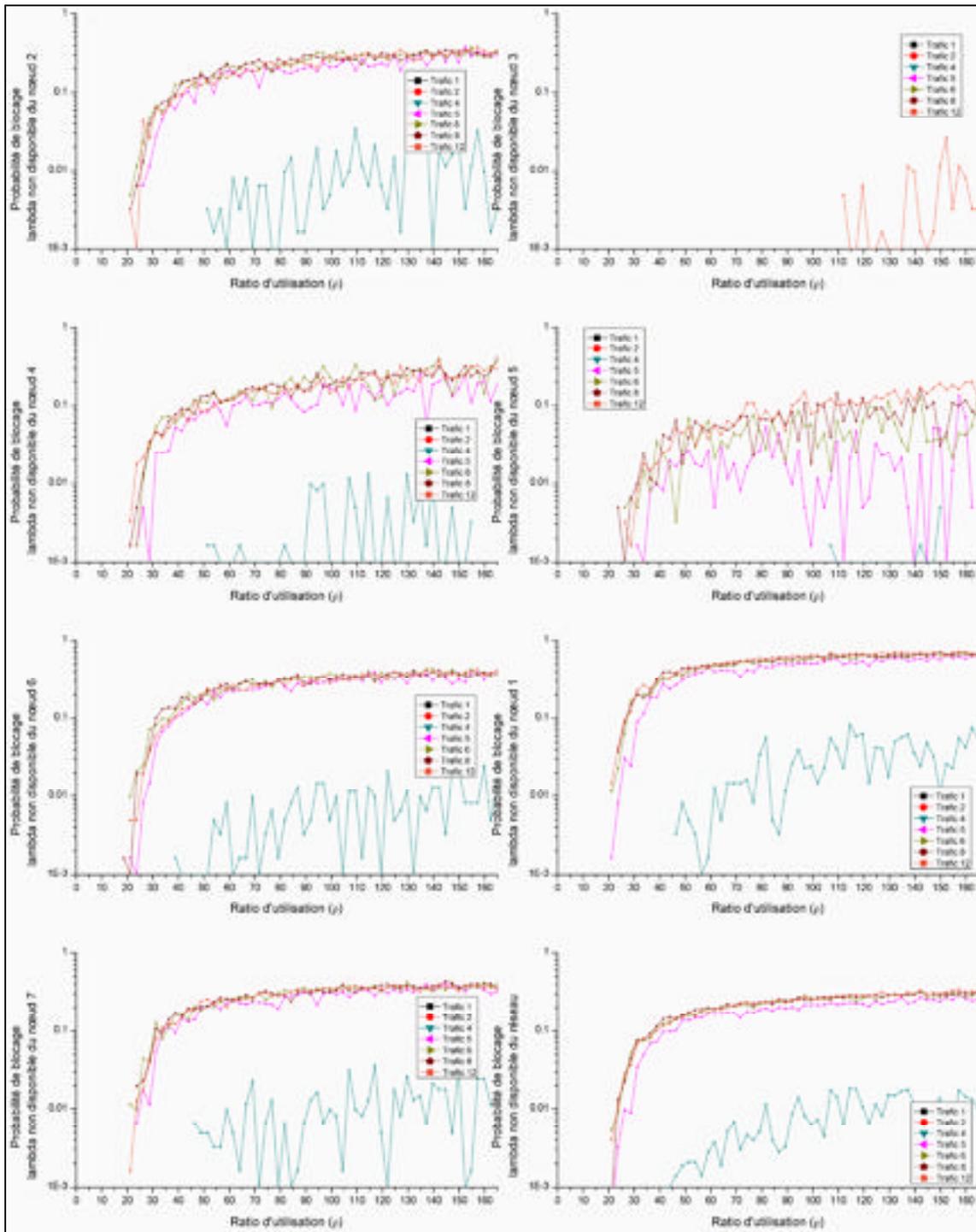


Figure 5.10 Probabilité de blocage par non disponibilité de longueur d'onde sur les arbres de chacun des nœuds et du réseau entier en fonction du ratio d'utilisation pour chacun des multiples d'une matrice de trafic unitaire

Même si ce sont des tendances qui peuvent être déduites dans une étude statique, la puissance de ces simulations est que la probabilité peut être quantifiée. Les simulations permettent également de déterminer précisément les seuils des différents régimes de blocage. Les simulations permettent de garantir la performance du réseau en termes de probabilité lors de l'établissement d'accords sur les niveaux de service. Elles permettent aussi de déterminer les endroits dans le réseau où plus ou moins de ressources sont nécessaires et d'évaluer comment l'allocation de différentes ressources peut influencer la performance du réseau. Par exemple, pour le multiple 5 de la matrice de trafic unitaire, le nœud 2 est limité par le manque de transmetteurs, de récepteurs et de canaux. Tandis que le nœud 3, dans les mêmes conditions, est seulement limité par le manque de transmetteurs et de récepteurs. Puisque le plan de contrôle a une grande influence sur les performances, ces résultats servent de conditions de base. Tout plan de contrôle doit avoir comme objectif d'améliorer ces performances.

La Figure 5.11 montre la probabilité de non disponibilité de transmetteur théorique en fonction du ratio d'utilisation pour chacun des multiples de matrice de trafic unitaire et déterminé à partir de l'équation (4.5). La figure montre aussi la limite à laquelle tous les canaux dans les arbres de fibres optiques sont utilisés ($3 \times 88 = 264$ canaux), dans le cas où l'on bloque un canal sur tout l'arbre. Un canal peut être utilisé plus d'une fois sur le même arbre et son utilisation dépend de la topologie et les canaux déjà existants sur cet arbre. Le besoin de simulations est nécessaire, car les résultats dépendent fortement de la topologie, tel qu'illustré en comparant les résultats obtenus (Figure 5.8) aux valeurs théoriques (Figure 5.11).

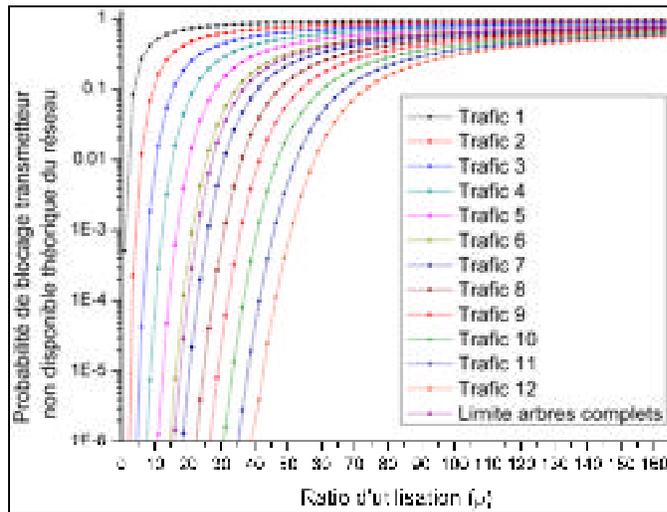


Figure 5.11 Probabilité de blocage par non disponibilité de transmetteur théorique en fonction du ratio d'utilisation pour chacun des multiples de matrice de trafic unitaire

La Figure 5.12 montre le temps moyen de préparation d'une demande de connexion acceptée en fonction du ratio d'utilisation pour chacun des multiples de matrice de trafic unitaire. Ce temps de préparation inclut l'initiation de la demande, l'accord des transmetteurs et des récepteurs (10 ms suivant une distribution normale avec 0.5 ms de déviation standard), les latences de propagation, ainsi que les communications du plan de contrôle, et se termine par la communication établie. À un faible taux d'utilisation, cette moyenne est constante alors qu'à un taux élevé, elle fluctue beaucoup, puisque la communication sur le canal de contrôle devient importante et les tailles des files d'attente suivent les fluctuations en fonction des demandes. Malgré ce fait, la capacité du canal de contrôle (155 Mb/s) est bien suffisante, car la moyenne demeure à 26 ms par connexion.

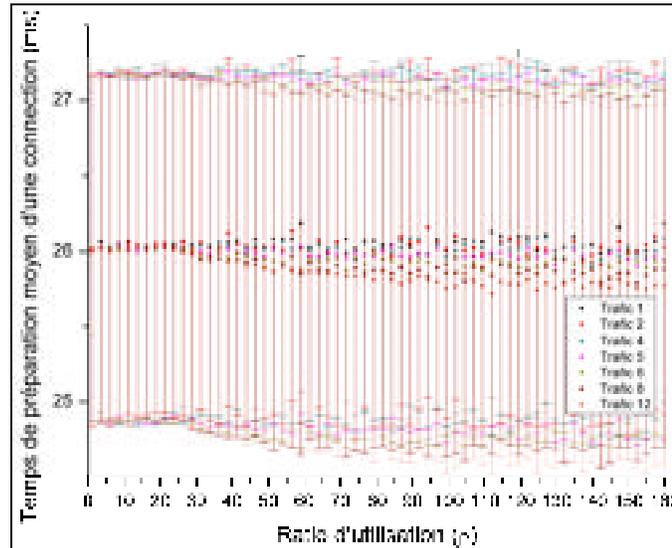


Figure 5.12 Temps moyen de préparation d'une demande de connexion en fonction du ratio d'utilisation pour chacun des multiples de matrice de trafic unitaire

Les figures 5.13 et 5.14, montrent respectivement le ratio d'utilisation des transmetteurs et le ratio d'utilisation des récepteurs donnés à chacun des nœuds et aussi pour l'ensemble du réseau en fonction du ratio d'utilisation et de l'évolution en fonction de l'évolution du trafic (en termes de multiples d'une matrice uniforme unitaire). Dans ce cas-ci, un ratio d'utilisation élevé des transmetteurs ou des récepteurs est désirable puisque les ressources sont utilisées plus efficacement mais au dépens d'une plus grande probabilité de blocage par non disponibilité de transmetteur ou de récepteur. On peut y voir que le nombre de transmetteurs aux nœuds 1 et 7 est surdimensionné alors que celui au nœud 3 est sous-dimensionné. Comparativement, le nombre de récepteurs est surdimensionné aux nœuds 1 et 3 et celui aux nœuds 2, 5, 6, et 7 est potentiellement sous-dimensionné.

Le ratio d'utilisation de canaux pour chacun des arbres de fibres optiques en fonction du ratio d'utilisation pour chacun des multiples de trafic unitaire est montré à la Figure 5.15. L'arbre

3, en rouge, est favorisé par ce plan de contrôle puisqu'il se connecte au plus grand nombre de nœuds, donc de plus courtes distances qui se traduisent par de plus petites latences.

Il est important de souligner que ces conclusions s'appliquent pour un plan de contrôle qui minimise les latences. Le ratio d'utilisation des transmetteurs et des récepteurs serait alors différent pour un autre plan de contrôle et des métriques différentes, ce qui sera exploré dans une prochaine étude. Évidemment, le ratio d'utilisation des canaux pour chacun des arbres de fibres optiques serait plus équilibré pour un plan de contrôle utilisant des métriques telles que TAW ou TAW2.

La Figure 5.35 montre l'utilisation moyenne des canaux (*networktreeUtil*) par rapport à l'ensemble des tous les arbres de fibres optiques et connus globalement par le simulateur en fonction du ratio d'utilisation pour chacun des multiples de trafic. Plus la moyenne du ratio est basse, plus la probabilité de blocage par non disponibilité d'une longueur d'onde est faible. La Figure 5.36 montre le ratio d'utilisation des canaux par chaque connexion (*linkUtil*) connue par le plan de contrôle de chacun des nœuds et moyennée sur tout le réseau en fonction du ratio d'utilisation pour chacun des multiples de trafic.

Le trafic normalisé à chacun des nœuds (*nodeTraffic*), en fonction du ratio d'utilisation pour chacun des multiples de trafic, est présenté à la Figure 5.18. C'est une autre façon de voir l'interrelation entre les paramètres, tel que discuté précédemment.

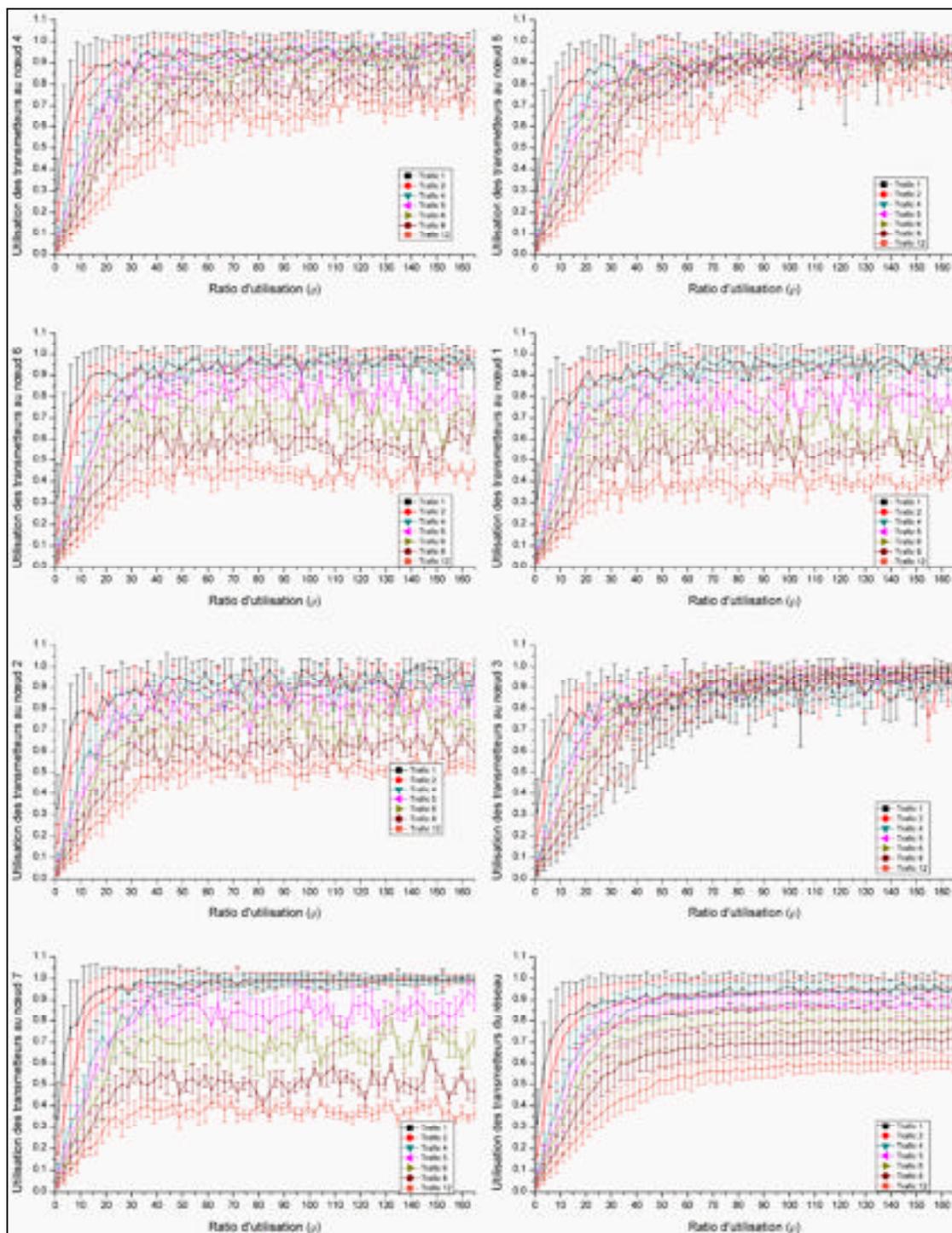


Figure 5.13 Le ratio d'utilisation moyen des transmetteurs à chacun des nœuds en fonction du ratio d'utilisation pour chacun des multiples de matrice de trafic, tel que défini par l'équation (4.11)

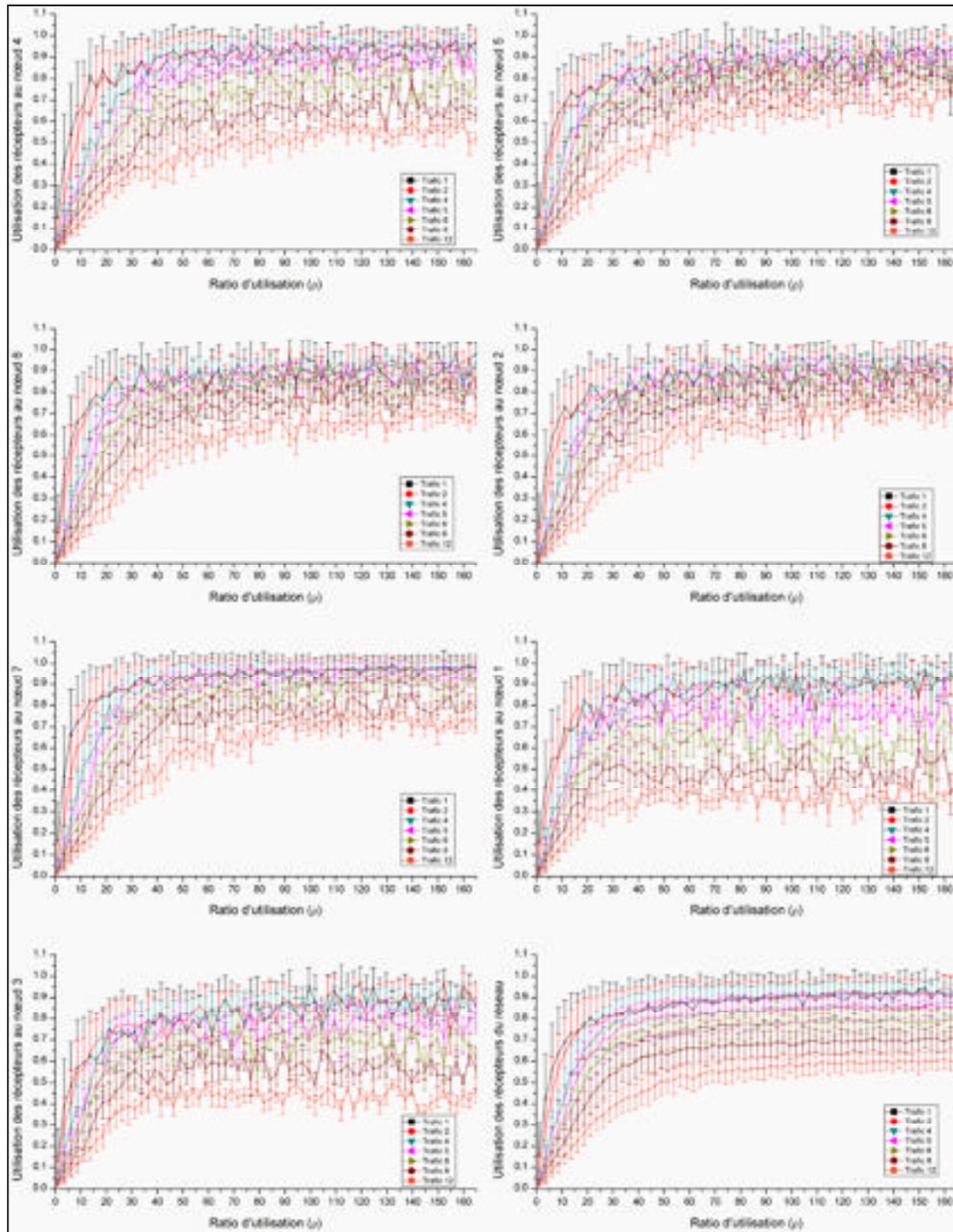


Figure 5.14 Le ratio d'utilisation moyen des récepteurs à chacun des nœuds en fonction du ratio d'utilisation pour chacun des multiples de matrice de trafic unitaire, tel que défini par l'équation (4.12)

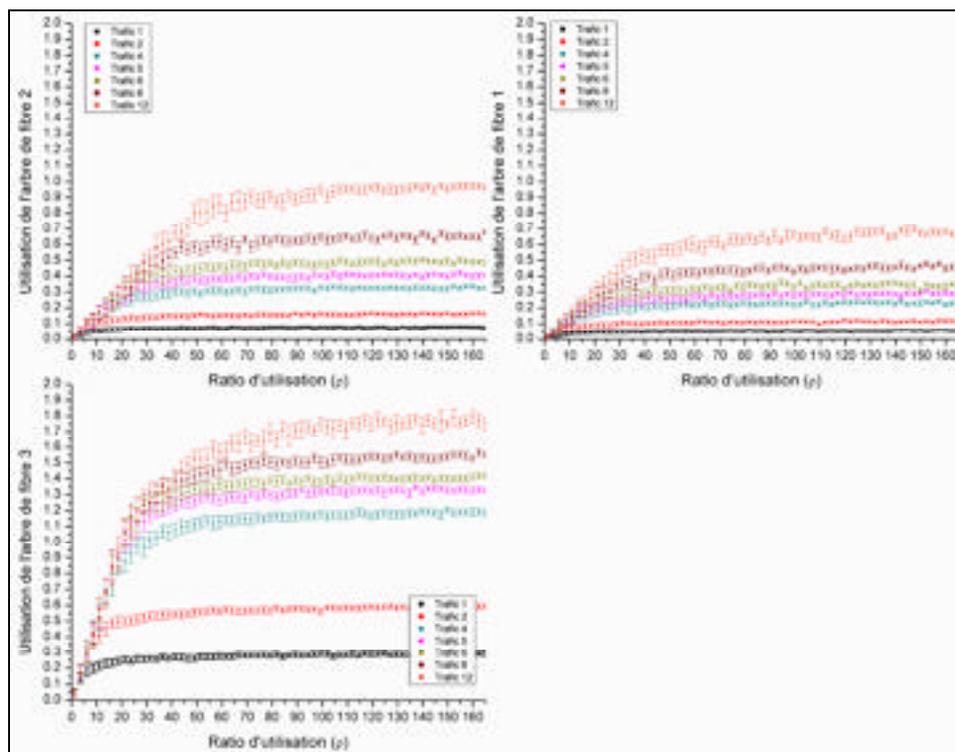


Figure 5.15 Le ratio d'utilisation de canaux (*treeUtil*) pour chacun des arbres de fibres optiques en fonction du ratio d'utilisation pour chacun des multiples de matrice de trafic unitaire

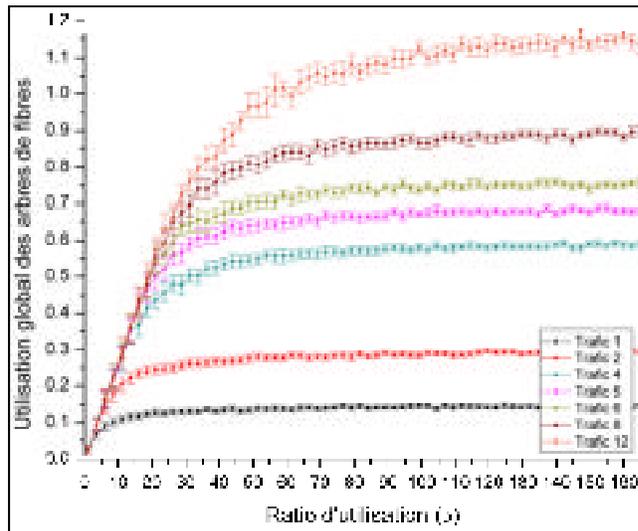


Figure 5.16 Ratio de l'utilisation moyenne des canaux (*networktreeUtil*) par rapport à l'ensemble des tous les arbres de fibres optiques et connus globalement par le simulateur en fonction du ratio d'utilisation pour chacun des multiples de matrice de trafic

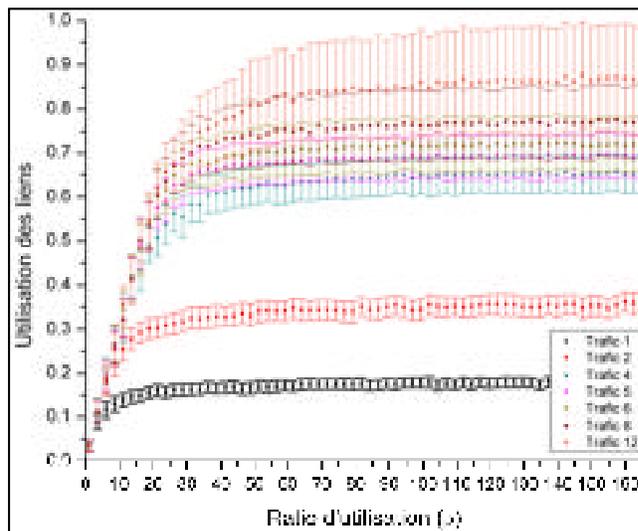


Figure 5.17 Le ratio d'utilisation des canaux par chaque connexion (*linkUtil*) connue par le plan de contrôle de chacun des nœuds et moyennée sur tout le réseau en fonction du ratio d'utilisation pour chacun des multiples de trafic

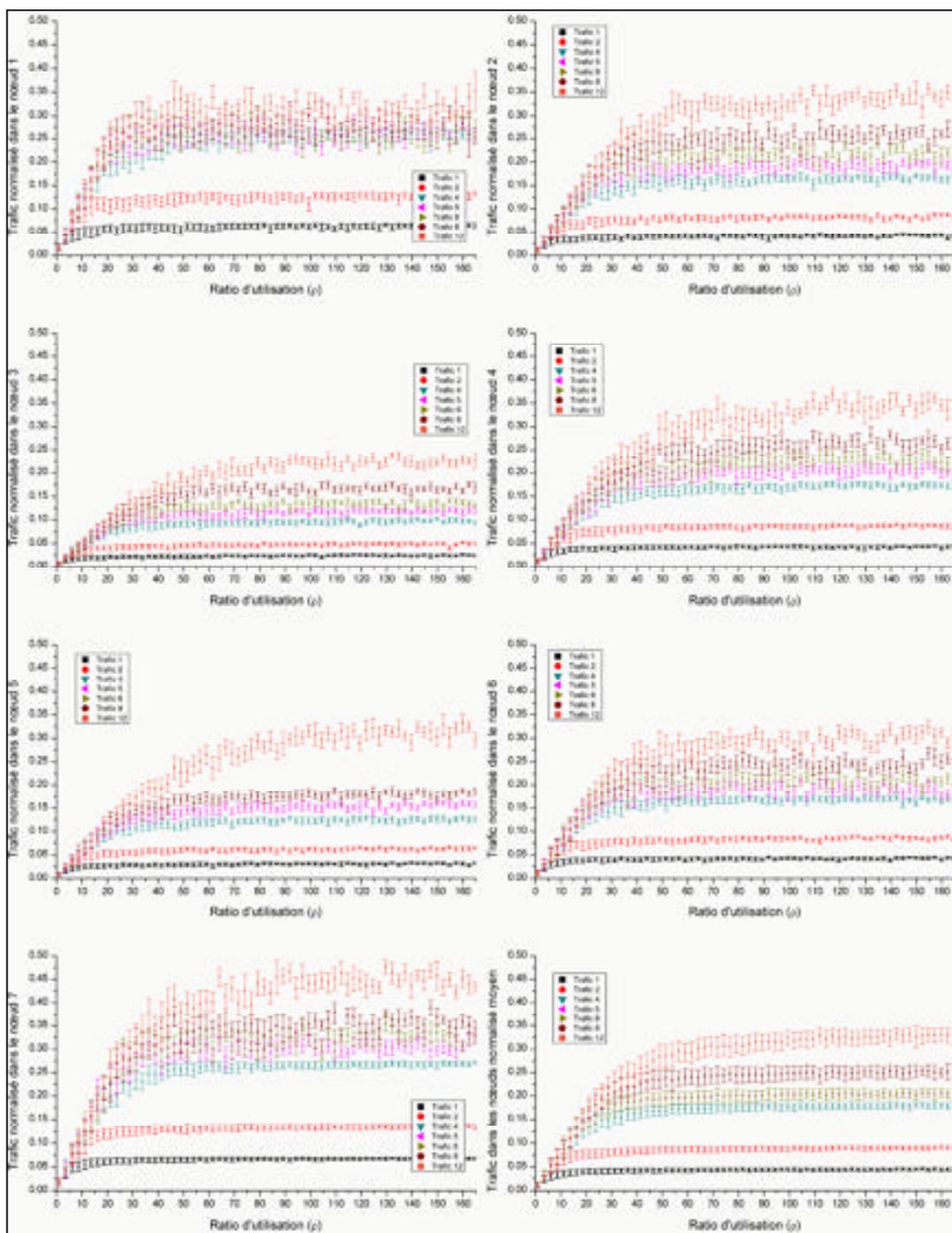


Figure 5.18 Le trafic normalisé à chacun des nœuds (*nodeTraffic*) en fonction du ratio d'utilisation pour chacun des multiples de matrice de trafic

Les résultats précédents ne tenaient compte que des ressources physiquement disponibles, c'est-à-dire, les transmetteurs, les récepteurs et le nombre de canaux. L'objectif de ce mémoire est d'avoir un plan de contrôle au courant des limitations de la couche physique, appliqué au réseau sans filtre. À part la latence, le BER doit aussi être pris en compte. Celui-ci est déduit à partir du rapport signal sur bruit optique finale ainsi que la paramétrisation des récepteurs DQPSK. Présentement, dans les simulations, le plan de contrôle assigne une longueur d'onde aléatoire choisie parmi les 88 canaux, sans déterminer préalablement si le BER sera acceptable pour ces canaux et ceux en cours. La Figure 5.19 ($\rho=1\dots160$) et la Figure 5.20 ($\rho=1\dots20$) montrent le même BER moyen, exprimé en $(-10\log_{10}(\text{BER}))$ avec l'écart-type correspondant, avant FEC, pendant la durée des connexions, en fonction du ratio d'utilisation pour chacun des multiples de trafic. On peut y voir clairement que, plus le ratio d'utilisation augmente (plus de trafic dans le réseau), meilleur le BER devient, puisque les EDFA ont un meilleur OSNR lorsque qu'ils sont plus chargés en canaux et en puissance d'entrée totale (vers la saturation de l'amplificateur). Aussi, lorsque le réseau est dimensionné pour un multiple de matrice de trafic plus grand, au même ratio d'utilisation, le BER devient moins bon. Cette dégradation du BER se produit car l'OSNR est plus faible en raison d'un plus grand gain nécessaire afin de remonter le signal avant et après les étages des coupleurs plus nombreux. La matrice de trafic unitaire fois 5 est optimale à un taux élevé de ratio d'utilisation, car le trafic augmente dans les arbres 1 et 2, puisqu'il n'est plus possible de minimiser les latences en passant par l'arbre 3.

Les figures 5.21-5.23 présentent la probabilité de blocage pour un BER après le FEC (code Reed-Solomon (239-255)), supérieure respectivement à 10^{-6} , à 10^{-9} et à 10^{-12} pour les canaux de données, en fonction du ratio d'utilisation pour chacun des multiples de trafic. Il est intéressant de noter qu'à un très bas ratio d'utilisation (aux alentours de 1), la probabilité de blocage diminue lorsque le multiple de matrice de trafic augmente (à l'exception de 8 et 12), alors que le BER se dégrade, mais l'écart-type est plus petit. Aux taux élevés de ratio d'utilisation, il manque de statistiques, mais une moyenne a été effectuée de $\rho=100\dots165$ dans les résultats qui suivent.

Dans ce cas-ci, la probabilité de blocage du BER post FEC supérieure à la valeur spécifiée (10^{-6} , 10^{-9} et 10^{-12}) correspond au pourcentage qui incluent tout le temps durant la connexion établie et non seulement au début de cette connexion. Le plan de contrôle doit éliminer l'établissement de ces connexions pour devenir une réelle probabilité de blocage du BER après FEC supérieure à une valeur spécifiée. Dans ce mémoire, elle représente donc alors une mesure de la performance de la couche physique réseau.

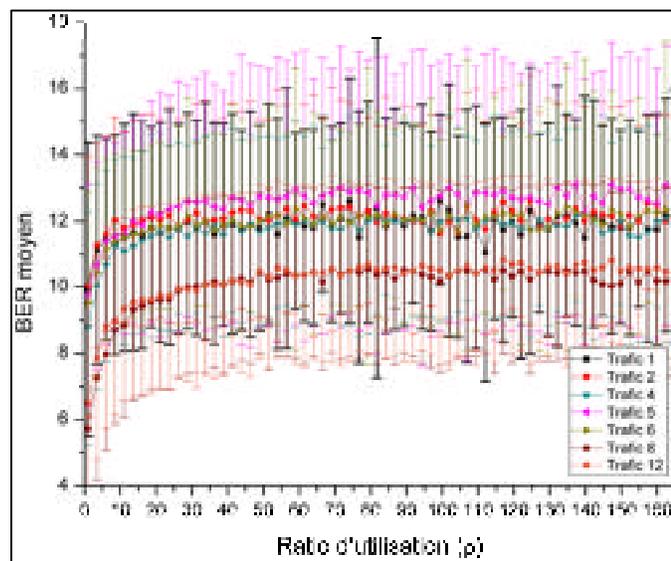


Figure 5.19 BER avant FEC pour les canaux de données en fonction du ratio d'utilisation de 1 à 160. Le BER est exprimé par $-10 \log_{10}(\text{BER})$

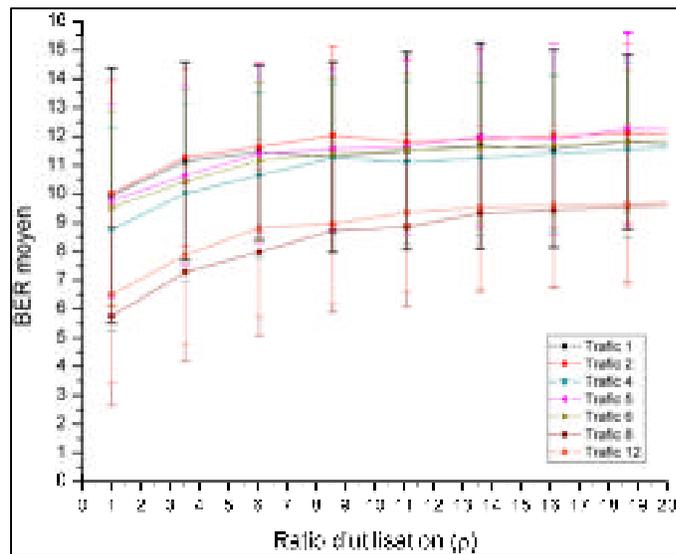


Figure 5.20 BER avant FEC pour les canaux de données en fonction du ratio d'utilisation de 1 à 20. Même résultats qu'à la figure précédente. Le BER est exprimé par $-10 \log_{10}(\text{BER})$

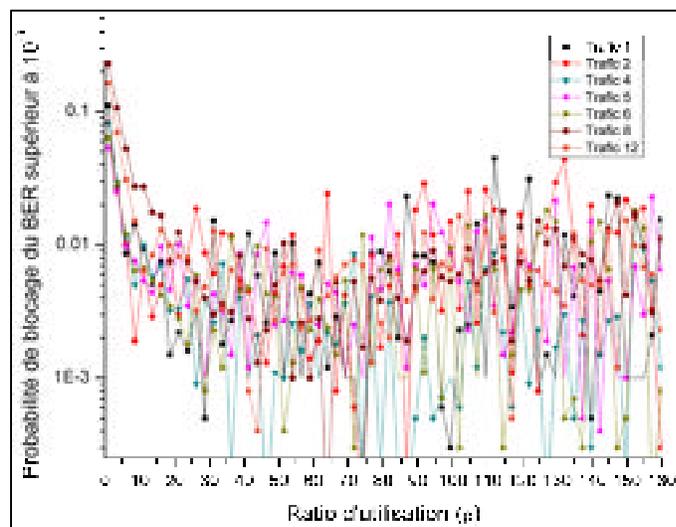


Figure 5.21 Probabilité de blocage pour un BER après FEC supérieur à 10^{-6} pour les canaux de données en fonction du ratio d'utilisation pour chacun des multiples de matrice de trafic

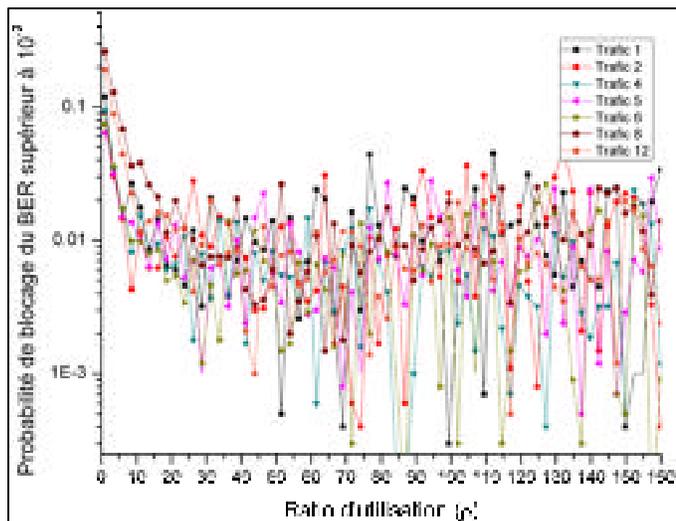


Figure 5.22 Probabilité de blocage pour un BER après FEC supérieur à 10^{-9} pour les canaux de données en fonction du ratio d'utilisation pour chacun des multiples de matrice de trafic

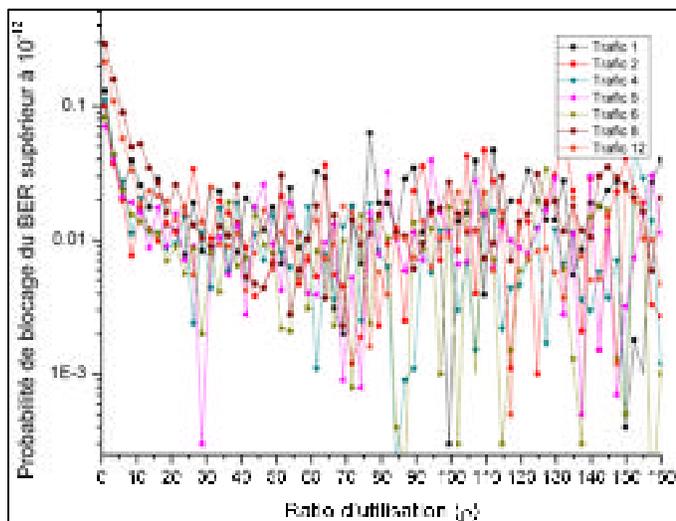


Figure 5.23 Probabilité de blocage pour un BER après FEC supérieur à 10^{-12} pour les canaux de données en fonction du ratio d'utilisation pour chacun des multiples de matrice de trafic

Le Tableau 5.4 montre la comparaison des paramètres globaux du réseau pour chacun des multiples de trafic à un ratio d'utilisation faible ($\rho=1$), et le Tableau 5.7, pour un ratio d'utilisation élevé ($\rho=165$). Les tableaux 5.5 et 5.8 montrent respectivement la probabilité de blocage due à un BER après le FEC supérieure à 10^{-6} , à 10^{-9} et à 10^{-12} , pour chacun des multiples de trafic à un ratio d'utilisation faible ($\rho=1$) et à un ratio d'utilisation élevé (moyenne de $\rho=100\dots165$).

Le Tableau 5.9 montre le ratio d'utilisation du réseau, le trafic moyen dans le réseau, la probabilité de blocage par non disponibilité de transmetteur, la probabilité de blocage par non disponibilité de récepteur, et la probabilité de blocage par non disponibilité de canal, lorsque la probabilité de blocage total de 2% est atteinte pour chacun des multiples de trafic. Il est évident que, pour une plus grande précision, des simulations autour de ce pourcentage doivent être faites. Néanmoins, elles éclairent sur les tendances. Cette valeur de 2% a été choisie arbitrairement; elle dépend des spécifications des clients pour le respect d'accord sur le niveau de service (SLA).

Finalement, les tableaux 5.6 et 5.10 montrent le classement des réseaux avec multiples de trafic, selon le paramètre global, à un ratio d'utilisation faible ($\rho=1$) et à un ratio d'utilisation élevé ($\rho=165$), respectivement.

Tableau 5.4 Comparaison des paramètres globaux du réseau pour chacun des multiples de trafic à un ratio d'utilisation **faible** ($\rho = 1$)

Matrice de trafic	Trafic du réseau				Trafic normalisé à chacun des nœuds et moyenné sur tout le réseau				Ratio d'utilisation des récepteurs				Ratio d'utilisation des transmetteurs			
	Moyenne	Déviati standard	Min	Max	Moyenne	Déviati standard	Min	Max	Moyenne	Déviati standard	Min	Max	Moyenne	Déviati standard	Min	Max
1	6.4	2.3	0.0	16.0	0.0114	0.0053	0.0040	0.0294	0.15	0.16	0.00	0.74	0.32	0.16	0.17	0.90
2	6.8	2.8	0.0	17.0	0.0117	0.0056	0.0040	0.0308	0.08	0.08	0.00	0.39	0.17	0.09	0.08	0.45
4	7.0	2.6	0.0	15.0	0.0119	0.0056	0.0040	0.0305	0.04	0.04	0.00	0.20	0.08	0.04	0.04	0.24
5	7.0	2.6	0.0	15.0	0.0119	0.0056	0.0040	0.0305	0.03	0.03	0.00	0.16	0.07	0.03	0.03	0.20
6	7.0	2.6	0.0	15.0	0.0119	0.0056	0.0040	0.0305	0.03	0.03	0.00	0.13	0.06	0.03	0.03	0.16
8	7.0	2.6	0.0	15.0	0.0119	0.0056	0.0040	0.0305	0.02	0.02	0.00	0.10	0.04	0.02	0.02	0.12
12	7.0	2.6	0.0	15.0	0.0119	0.0056	0.0040	0.0305	0.01	0.01	0.00	0.07	0.03	0.01	0.01	0.08
	Ratio d'utilisation des liens				Ratio d'utilisation des arbres de fibres optiques				Latence				BER avant la FEC			
	Moyenne	Déviati standard	Min	Max	Moyenne	Déviati standard	Min	Max	Moyenne	Déviati standard	Min	Max	Moyenne	Déviati standard	Min	Max
1	0.034	0.012	0.004	0.083	0.024	0.009	0.000	0.061	2.000	0.981	0.569	5.988	9.94	4.44	0.30	32.43
2	0.034	0.013	0.002	0.077	0.026	0.010	0.000	0.064	1.911	0.932	0.569	4.886	10.02	3.92	0.36	18.90
4	0.035	0.012	0.002	0.078	0.027	0.010	0.000	0.057	1.896	0.914	0.569	3.783	8.77	3.52	0.32	17.21
5	0.035	0.012	0.002	0.078	0.027	0.010	0.000	0.057	1.896	0.914	0.569	3.783	9.76	3.35	0.33	17.33
6	0.035	0.012	0.002	0.078	0.027	0.010	0.000	0.057	1.896	0.914	0.569	3.783	9.51	3.37	0.33	17.33
8	0.035	0.012	0.002	0.078	0.027	0.010	0.000	0.057	1.896	0.914	0.569	3.783	5.75	3.11	0.32	14.95
12	0.035	0.012	0.002	0.078	0.027	0.010	0.000	0.057	1.896	0.914	0.569	3.783	6.51	3.08	0.32	15.36

Tableau 5.5 Probabilité de blocage due à respectivement un BER après FEC supérieur à 10^{-6} , à 10^{-9} et à 10^{-12} pour chacun des multiples de trafic à un ratio d'utilisation **faible** ($\rho = 1$)

Matrice de trafic	Probabilité de blocage du au BER après la FEC		
	10^{-6}	10^{-9}	10^{-12}
1	11.13%	12.02%	13.01%
2	8.25%	9.12%	10.04%
4	8.22%	9.35%	11.01%
5	5.36%	6.37%	7.07%
6	6.32%	7.43%	8.25%
8	22.74%	26.01%	29.30%
12	16.27%	19.06%	21.50%

Tableau 5.6 Classement des réseaux avec multiples de trafic selon le paramètre global à un ratio d'utilisation **faible** ($\rho = 1$)

Classement	Trafic du réseau	Trafic normalisé à chacun des nœuds et moyenné sur tout le réseau	Ratio d'utilisation des récepteurs	Ratio d'utilisation des transmetteurs	Ratio d'utilisation des liens	Ratio d'utilisation des arbres de fibres	Latence	BER avant la FEC	Probabilité de blocage du au BER après la FEC (10^{-9})
1	TM12	TM12	TM1	TM1	TM1	TM1	TM12	TM2	TM5
2	TM8	TM8	TM2	TM2	TM2	TM2	TM8	TM1	TM6
3	TM6	TM6	TM4	TM4	TM4	TM4	TM6	TM5	TM2
4	TM5	TM5	TM5	TM5	TM5	TM5	TM5	TM6	TM4
5	TM4	TM4	TM6	TM6	TM6	TM6	TM4	TM4	TM1
6	TM2	TM2	TM8	TM8	TM8	TM8	TM2	TM12	TM12
7	TM1	TM1	TM12	TM12	TM12	TM12	TM1	TM8	TM8

Tableau 5.7 Comparaison des paramètres globaux du réseau pour chacun des multiples de matrice de trafic à un ratio d'utilisation élevé ($\rho = 165$)

Matrice de trafic	Trafic du réseau				Trafic normalisé à chacun des nœuds et moyenné sur tout le réseau				Ratio d'utilisation des récepteurs				Ratio d'utilisation des transmetteurs			
	Moyenne	Déviati standard	Min	Max	Moyenne	Déviati standard	Min	Max	Moyenne	Déviati standard	Min	Max	Moyenne	Déviati standard	Min	Max
1	38.9	1.2	34.0	41.0	0.0454	0.0028	0.0341	0.0477	0.93	0.09	0.60	1.00	0.96	0.07	0.67	1.00
2	77.4	1.6	73.0	81.0	0.0900	0.0037	0.0772	0.0944	0.92	0.06	0.73	0.98	0.95	0.05	0.76	1.00
4	155.6	2.3	148.0	162.0	0.1802	0.0061	0.1607	0.1902	0.93	0.04	0.80	0.99	0.95	0.04	0.80	1.00
5	179.7	1.8	174.0	184.0	0.2039	0.0096	0.1786	0.2241	0.85	0.06	0.71	0.94	0.87	0.06	0.69	0.97
6	199.7	2.7	190.0	205.0	0.2250	0.0106	0.1993	0.2457	0.79	0.06	0.65	0.90	0.80	0.05	0.68	0.89
8	237.6	3.6	227.0	246.0	0.2528	0.0138	0.2224	0.2824	0.71	0.05	0.60	0.81	0.72	0.05	0.60	0.81
12	298.7	4.2	286.0	308.0	0.3275	0.0184	0.2866	0.3620	0.59	0.05	0.49	0.69	0.60	0.04	0.51	0.68
	Ratio d'utilisation des liens				Ratio d'utilisation des arbres de fibres				Latence				BER avant la FEC			
	Moyenne	Déviati standard	Min	Max	Moyenne	Déviati standard	Min	Max	Moyenne	Déviati standard	Min	Max	Moyenne	Déviati standard	Min	Max
1	0.181	0.012	0.128	0.199	0.147	0.005	0.129	0.155	2.122	1.127	0.569	5.988	11.88	3.40	1.88	25.93
2	0.362	0.022	0.290	0.390	0.293	0.006	0.277	0.307	2.183	1.061	0.569	5.214	12.15	3.29	1.65	30.28
4	0.652	0.043	0.518	0.692	0.589	0.009	0.561	0.614	2.060	1.011	0.569	5.214	11.90	2.96	0.88	34.25
5	0.694	0.050	0.555	0.725	0.681	0.007	0.659	0.697	2.079	1.043	0.569	5.988	12.78	4.10	1.42	36.83
6	0.720	0.062	0.560	0.758	0.757	0.010	0.720	0.777	2.071	1.035	0.569	5.988	12.12	3.39	1.59	47.75
8	0.775	0.084	0.558	0.827	0.900	0.013	0.860	0.932	1.998	1.057	0.569	5.988	10.34	2.69	0.49	16.20
12	0.863	0.121	0.559	0.927	1.131	0.016	1.083	1.167	1.994	1.086	0.569	5.988	10.56	2.68	0.77	17.02

Tableau 5.8 Probabilité de blocage due à respectivement un BER après FEC supérieur à 10^{-6} , à 10^{-9} et à 10^{-12} pour chacun des multiples de trafic à un ratio d'utilisation élevé (moyenne de $\rho = 100 \dots 165$)

Matrice de trafic	Probabilité de blocage due au BER après la FEC		
	10^{-6}	10^{-9}	10^{-12}
1	0.88%	1.33%	1.87%
2	1.27%	1.53%	1.89%
4	0.33%	0.62%	0.90%
5	0.63%	0.84%	1.15%
6	0.65%	0.82%	0.95%
8	0.96%	1.45%	1.87%
12	0.76%	0.94%	1.13%

Tableau 5.9 Le ratio d'utilisation du réseau, le trafic moyen dans le réseau, la probabilité de blocage par non disponibilité de transmetteur, la probabilité de blocage par non disponibilité de récepteurs et la probabilité de blocage par non disponibilité de canal lorsque la probabilité de blocage total de 2% est atteinte pour chacun des multiples de trafic

Matrice de trafic	Ratio d'utilisation (BP \geq 2%)	Trafic moyen	Probabilité de blocage (transmetteur)	Probabilité de blocage (récepteur)	Probabilité de blocage (lambda)
1	1.0	6.4	1.07%	4.34%	0.00%
2	3.5	24.1	0.58%	3.55%	0.00%
4	8.6	58.0	0.33%	2.53%	0.00%
5	11.1	73.3	0.19%	2.04%	0.00%
6	13.6	94.0	0.00%	2.46%	0.00%
8	18.7	126.4	0.00%	1.90%	0.02%
12	23.7	165.7	0.02%	1.05%	1.11%

Tableau 5.10 Classement des réseaux avec multiples de trafic selon le paramètre global à un ratio d'utilisation élevé ($\rho = 165$)

Classement	Trafic du réseau	Trafic normalisé à chacun des nœuds et moyenné sur tout le réseau	Ratio d'utilisation des récepteurs	Ratio d'utilisation des transmetteurs	Ratio d'utilisation des liens	Ratio d'utilisation des arbres de fibres	Latence	BER avant la FEC	Probabilité de blocage du au BER après la FEC (10^{-9})	Blocage total (BP \geq 2%)
1	TM12	TM12	TM1	TM1	TM1	TM1	TM12	TM5	TM4	TM12
2	TM8	TM8	TM4	TM4	TM4	TM4	TM8	TM2	TM6	TM8
3	TM6	TM6	TM2	TM2	TM2	TM2	TM6	TM6	TM5	TM6
4	TM5	TM5	TM5	TM5	TM5	TM5	TM5	TM4	TM12	TM5
5	TM4	TM4	TM6	TM6	TM6	TM6	TM4	TM1	TM1	TM4
6	TM2	TM2	TM8	TM8	TM8	TM8	TM2	TM12	TM8	TM2
7	TM1	TM1	TM12	TM12	TM12	TM12	TM1	TM8	TM2	TM1

Si l'on assigne un poids de 1 pour les paramètres classés dans les tableaux 5.6 et 5.10, on déduit, en négligeant l'influence des coûts, qu'à des ratios d'utilisation faible ou élevé, les meilleures solutions en performance dynamique globale sont par ordre croissant TM12, TM8, TM6, TM5, TM4 et TM1. Ces résultats ne sont pas surprenants dans ce contexte, mais peuvent être différents pour un autre plan de contrôle.

5.1.2 Étude du réseau allemand à 7 nœuds en fonction de la topologie

Dans cette section, on s'intéresse à la performance dynamique du réseau allemand à 7 nœuds en fonction de la topologie. Le réseau de la section précédente, JOCN allemand 7 avec une

matrice de trafic 6 fois la matrice de trafic unitaire a été choisi car sa performance est maximisée si l'on considère également le trafic maximal et le coût du réseau. Les cinq autres solutions sont comparées à cette solution de référence. La Figure 5.24 montre les six solutions sans filtre à l'étude. Le nombre d'arbres de fibres optiques et le pourcentage de protection y sont indiqués.

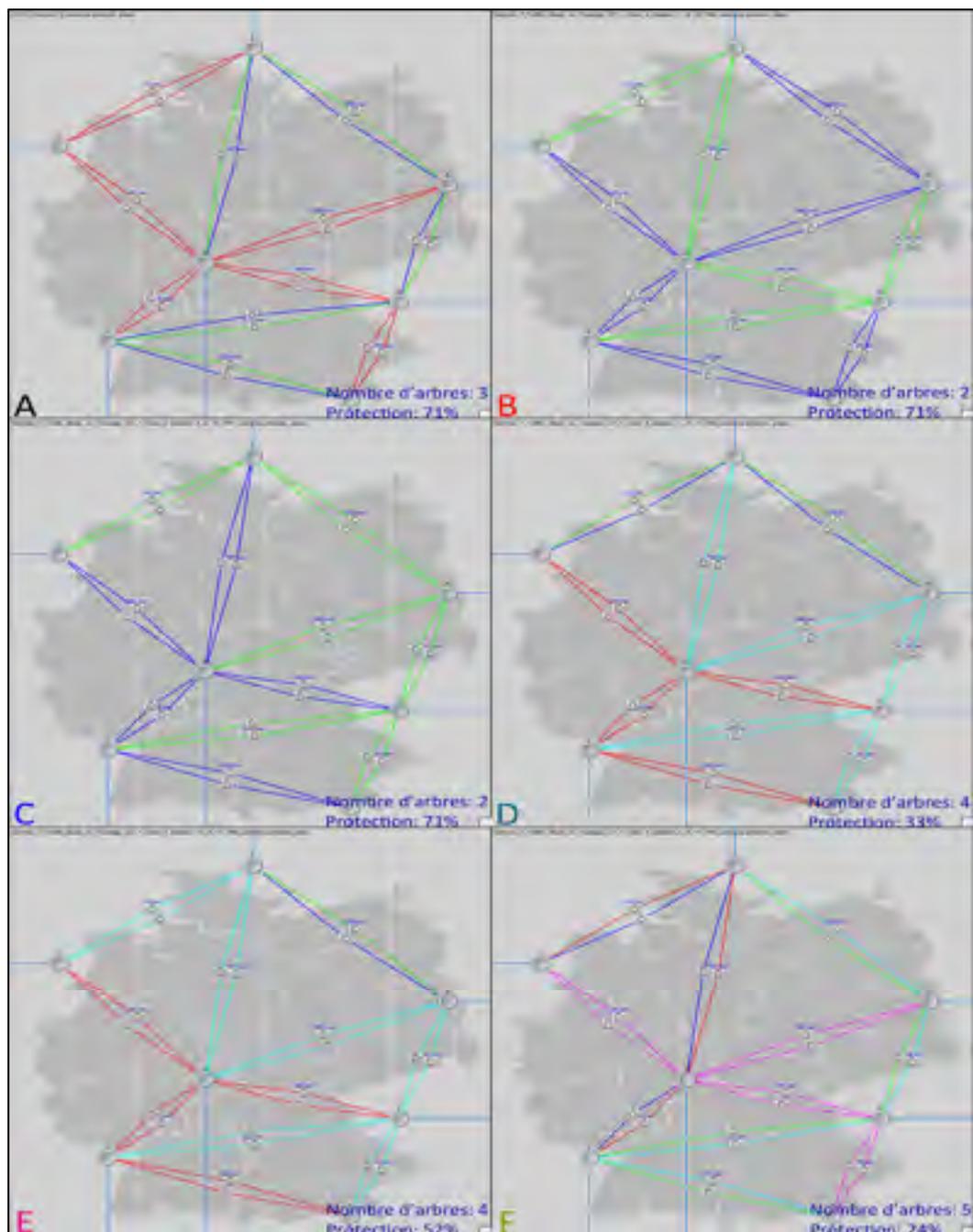


Figure 5.24 Les six solutions sans filtre du réseau allemand à 7 nœuds choisies pour l'étude en fonction de la topologie des arbres de fibres optiques

Les nombres de composantes pour former ces réseaux sont tous identiques, à part des coupleurs responsables de la division et de l'addition des arbres de fibres optiques, de l'extraction, ainsi que les préamplificateurs de division et les post-amplificateurs d'addition de signal (canal). Les coûts totaux des composantes photoniques de ces réseaux varient entre \$6 056 000 et \$6 073 600 et sont donc considérés comme identiques pour cette analyse.

Afin d'analyser les réseaux avec une plus grande précision à bas, à moyen et à haut trafic, comparativement à la section précédente, le taux des départs μ est fixé à $2.3 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$, donnant un temps de service moyen d'environ 12.1 heures. Quant au taux des arrivées λ , il varie entre $2.3 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ et $1.1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ en saut de $3.8 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$, donnant un temps moyen entre les arrivées, débutant à 12.1 heures jusqu'à 15.3 minutes avec un saut débutant à 7.5 heures et se terminant à 32.4 secondes. Le ratio d'utilisation ρ est donc varié de 1.0 à 48.9 par sauts de 1.65 Erlang. Comme dans la section précédente, l'analyse statistique est faite encore en régime permanent.

Pour cette étude, en fonction de la topologie des arbres de fibres optiques, un total de 7 546 demandes ont été effectuées dans le réseau pour chacun des ratios d'utilisation. Le nombre de demandes est suffisant pour la comparaison des différentes topologies, mais pour de bonnes statistiques précises des réseaux, un nombre minimal de demandes serait de 25 872. Les contraintes de temps de calcul nécessaire n'ont pas permis d'obtenir ces statistiques. La métrique choisie est celle qui minimise les latences et l'assignation des longueurs d'onde se fait de façon aléatoire.

Les solutions sans filtre statiques pour les six solutions du réseau allemand à 7 nœuds choisies pour l'étude, en fonction de la topologie des arbres, avec le ratio d'utilisation moyen des canaux sur le total des arbres, sont exposées au Tableau 5.11. Le nombre de demandes est le maximum théorique de capacité du réseau dans un contexte statique où chaque demande est assignée. Le Tableau 5.12 montre le nombre d'arbres de fibres optiques et le degré à chacun des nœuds correspondant, pour les six solutions de réseau.

Tableau 5.11 Solutions sans filtre statiques pour les six solutions du réseau allemand à 7 nœuds choisies pour l'étude en fonction de la topologie des arbres

Réseau allemand 7	Nombre de lambda	Longueurs moyennes demandes (km)	Nombre de combinaisons	Nombre de demandes	Nombre de demandes par arbres de fibre optique					Ratio d'utilisation moyenne des canaux (networktreeUtil)
					Arbre de fibre 1	Arbre de fibre 2	Arbre de fibre 3	Arbre de fibre 4	Arbre de fibre 5	
A	78	389	8	252	36	48	168	0	0	0.16
B	78	430	6	252	162	90	0	0	0	0.32
C	55	366	14	252	126	126	0	0	0	0.48
D	58	406	6	252	18	18	96	120	0	0.64
E	67	413	6	252	6	6	96	144	0	0.80
F	48	404	3	252	30	42	30	48	102	0.95

Tableau 5.12 Le nombre d'arbres de fibres optiques et le degré à chacun des nœuds correspondant pour les six solutions de réseau

Nœud	Nombre d'arbres de fibres optiques						Degré du nœud
	Réseau A	Réseau B	Réseau C	Réseau D	Réseau E	Réseau F	
1	1	2	2	3	2	3	2
2	3	2	2	3	3	4	3
3	3	2	2	2	2	3	5
4	3	2	1	3	3	3	3
5	3	2	2	2	2	3	4
6	3	2	2	2	2	4	3
7	3	1	2	2	2	3	2

La Figure 5.25 montre le trafic moyen sur les réseaux en fonction du ratio d'utilisation pour les six solutions du réseau en régime permanent. On peut y voir qu'à un ratio d'utilisation faible la capacité de trafic est essentiellement la même, mais, à un taux élevé, les courbes divergent et la capacité maximale est directement corrélée avec le nombre minimal de longueurs d'onde pour satisfaire les connexions en régime statique. En extrapolant les courbes à $\rho = 72$, on voit que les courbes n'atteindront pas le maximum théorique de 252, laissant la place pour un plan de contrôle capable de tenter de maximiser la capacité du réseau au lieu de minimiser les latences dans ce cas-ci. La Figure 5.26 montre les latences moyennes des connexions établies en fonction du ratio d'utilisation pour les six solutions du réseau allemand. Pour chaque réseau, il y a une transition entre le régime à plus basse latence moyenne et celui à plus haute latence moyenne et, plus le nombre d'arbre est petit, plus grand

est l'écart de magnitude de cette transition. Les magnitudes de ces moyennes suivent l'ordre des longueurs moyennes des demandes.

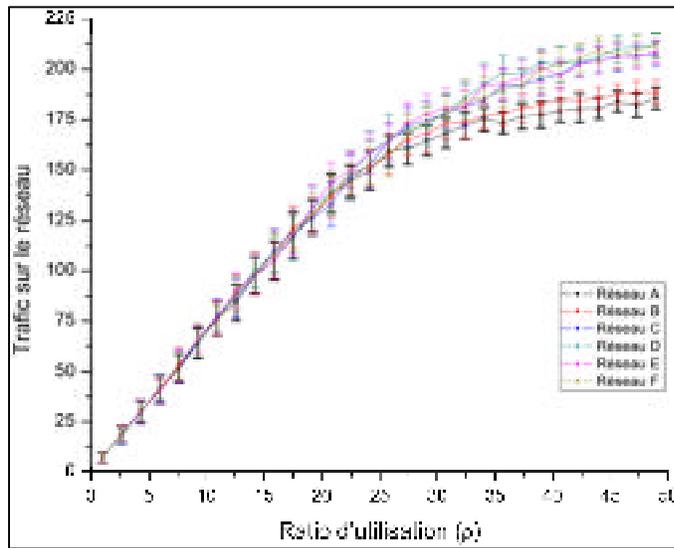


Figure 5.25 Moyenne du trafic en fonction du ratio d'utilisation pour les six solutions du réseau allemand à 7 nœuds choisies pour l'étude en fonction de la topologie des arbres de fibres optiques

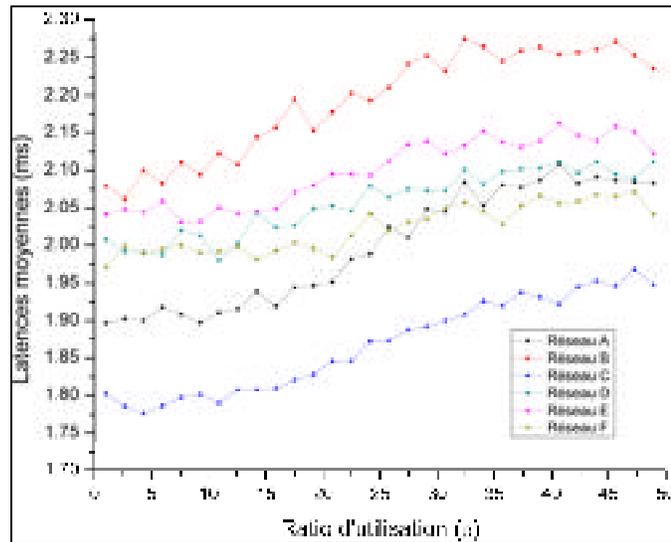


Figure 5.26 Latence moyenne des connexions établies en fonction du ratio d'utilisation pour les six solutions du réseau allemand à 7 nœuds choisies pour l'étude en fonction de la topologie des arbres de fibres optiques

Les figures 5.27-5.30 montrent respectivement la probabilité de blocage total, la probabilité de blocage par non disponibilité de transmetteur, la probabilité de blocage par non disponibilité de récepteur et finalement, la probabilité de blocage par non disponibilité de canal. Ces probabilités de blocage sont données à chacun des nœuds et aussi pour l'ensemble du réseau en fonction du ratio d'utilisation pour les six solutions du réseau.

Il est difficile de faire une synthèse de ces probabilités, car cela dépend grandement du régime auquel on s'intéresse. Mais, si on les classifie par ordre du plus grand ratio d'utilisation au plus petit lorsque le 2% de probabilité de blocage est atteint, et de la plus grande capacité de trafic lorsque les ratios d'utilisation sont égaux, tel qu'au Tableau 5.18, ils sont dans l'ordre suivant: E, D, C, F, B et A. Il n'est pas évident d'identifier quels paramètres entrent en jeu pour déterminer cet ordre. Une étude plus approfondie devra être effectuée.

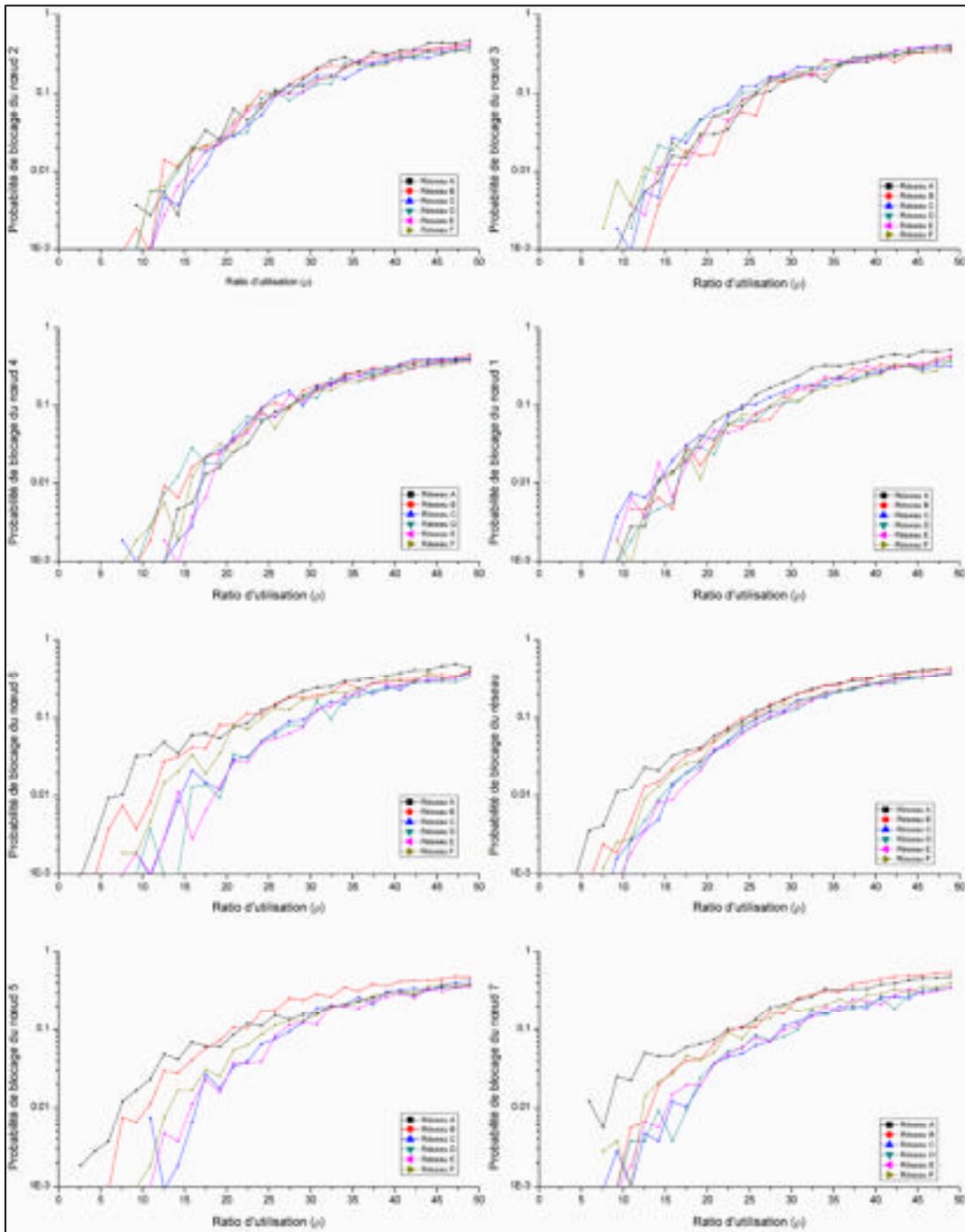


Figure 5.27 Probabilité de blocage total (incluant la probabilité de blocage par non disponibilité de transmetteur, de récepteur et de canal) de chacun des nœuds et du réseau entier en fonction du ratio d'utilisation pour les six solutions du réseau allemand à 7 nœuds

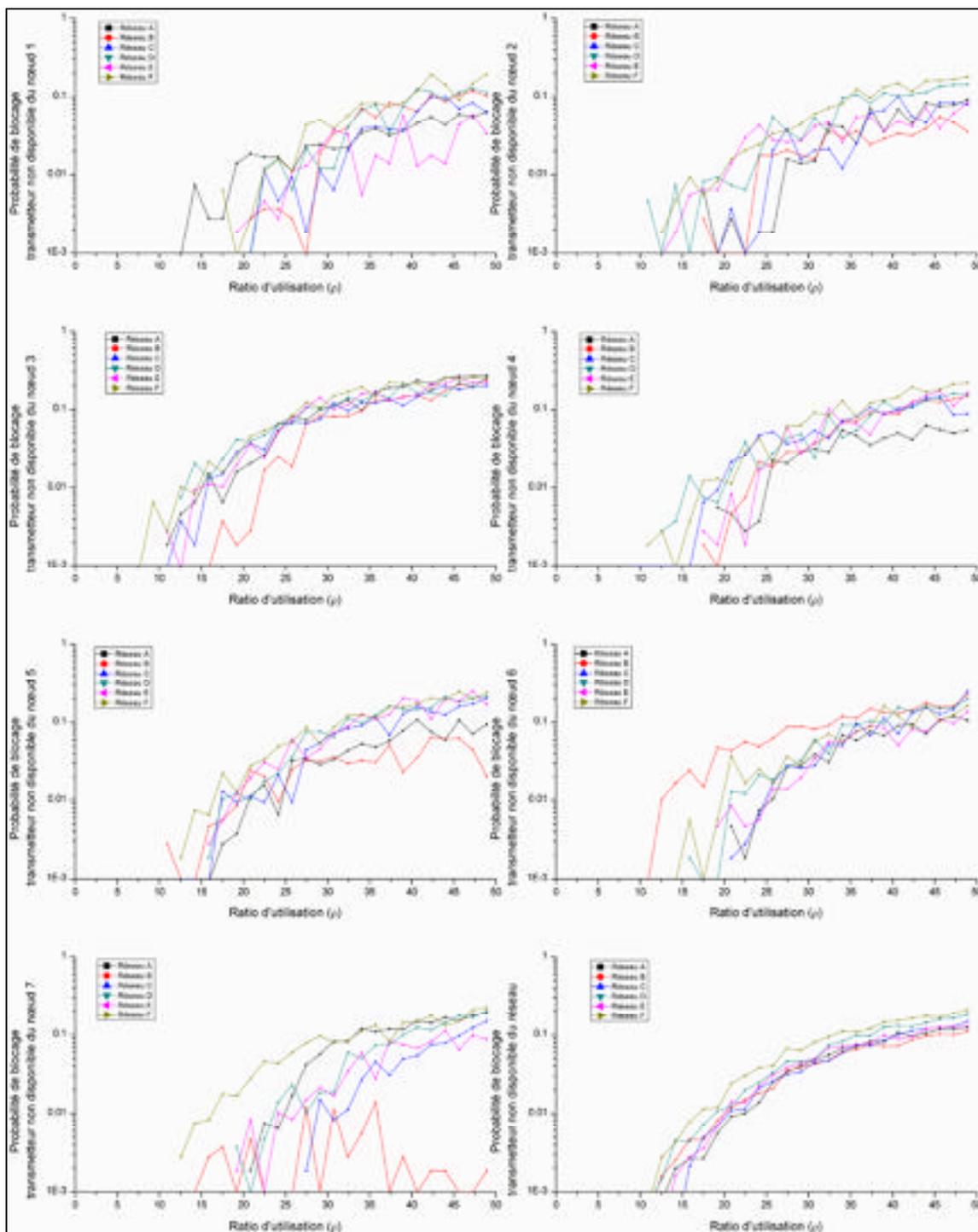


Figure 5.28 Probabilité de blocage par non disponibilité de transmetteur de chacun des nœuds et du réseau entier en fonction du ratio d'utilisation pour les six solutions du réseau allemand à 7 nœuds

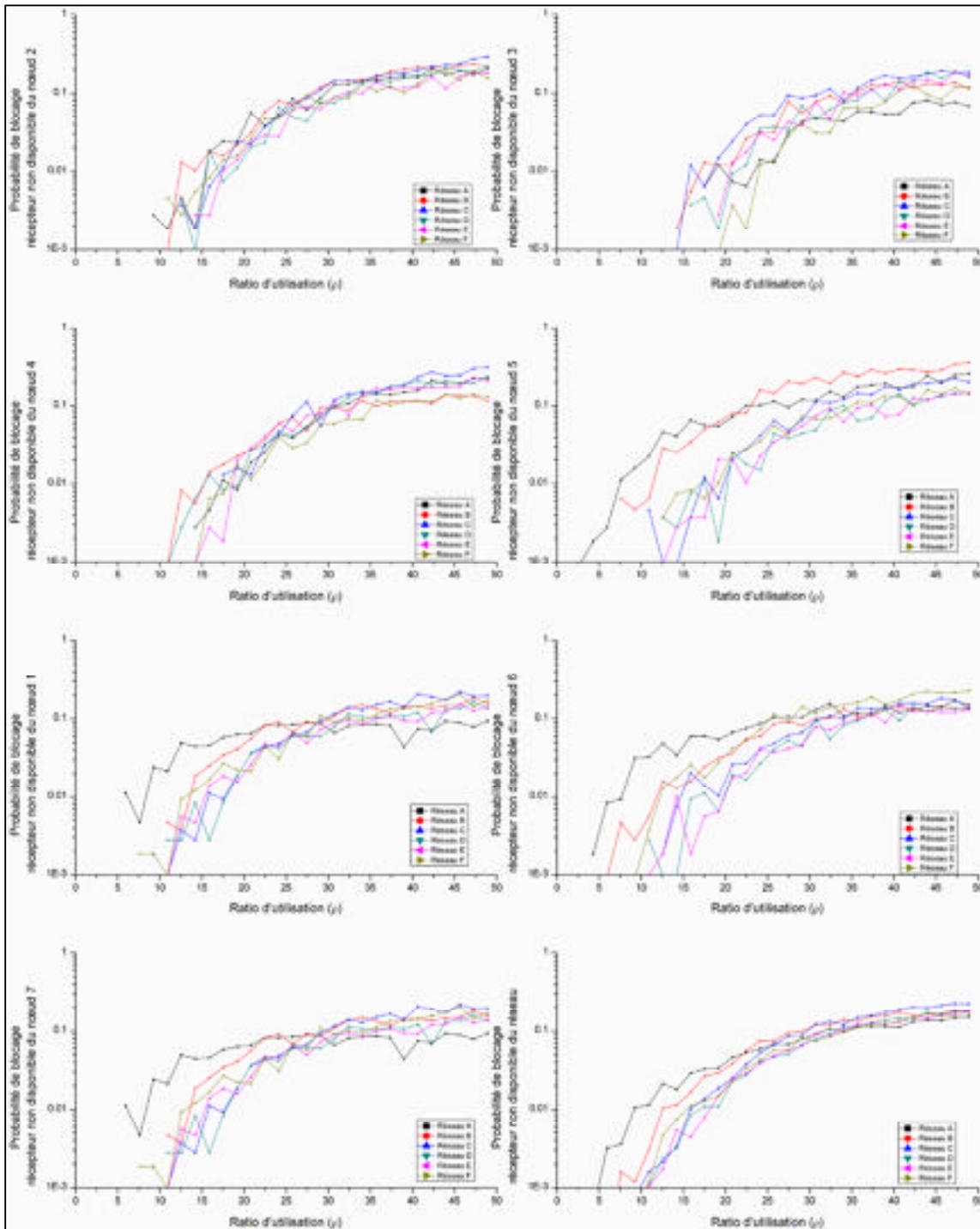


Figure 5.29 Probabilité de blocage par non disponibilité de récepteur de chacun des nœuds et du réseau entier en fonction du ratio d'utilisation pour les six solutions du réseau allemand à 7 nœuds

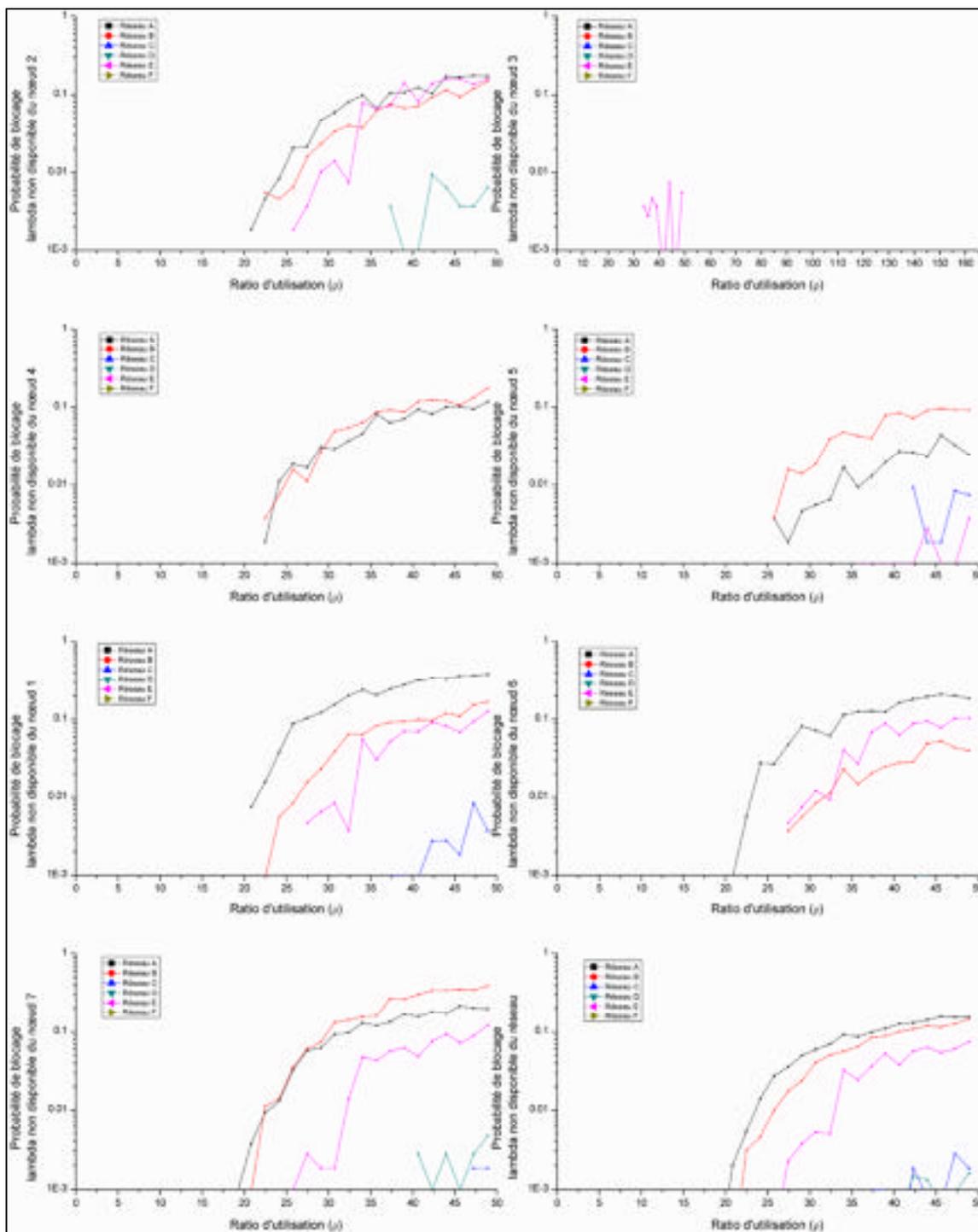


Figure 5.30 Probabilité de blocage par non disponibilité de longueur d'onde sur les arbres de chacun des nœuds et du réseau entier en fonction du ratio d'utilisation pour les six solutions du réseau allemand à 7 nœuds

La Figure 5.31 montre le temps de préparation moyen d'une demande de connexion (acceptée) en fonction du ratio d'utilisation.

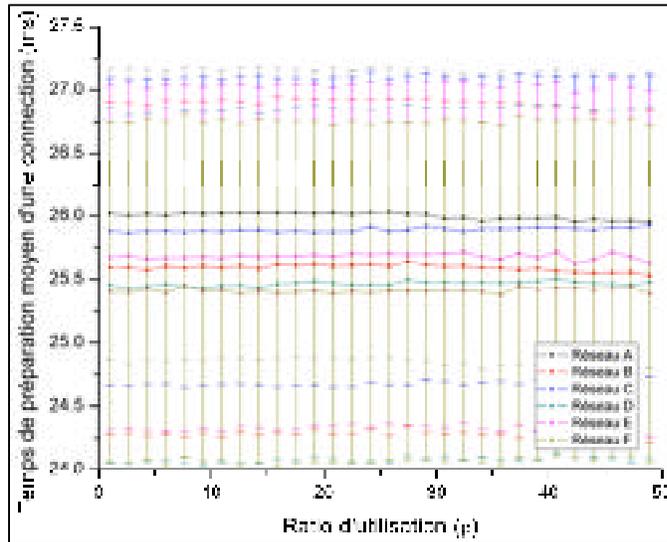


Figure 5.31 Temps de préparation moyen d'une demande de chemin lumineux en fonction du ratio d'utilisation pour les six solutions du réseau allemand à 7 nœuds

Les figures 5.32 et 5.33 montrent respectivement le ratio d'utilisation des transmetteurs et le ratio d'utilisation des récepteurs donné à chacun des nœuds et aussi pour l'ensemble du réseau en fonction ces ratios. Il est intéressant de noter qu'en moyenne le réseau A et le réseau B ont un ratio d'utilisation des transmetteurs et des récepteurs inférieur aux autres réseaux et ceux-ci ont une corrélation avec la probabilité de blocage par non disponibilité de longueur d'onde et de récepteurs.

Le ratio d'utilisation des canaux (*treeUtil*) pour chaque arbre de fibres optiques avec couleurs correspondantes à ces arbres en fonction du ratio d'utilisation pour les six solutions du réseau allemand sont montrés à la Figure 5.34. Il est intéressant de noter qu'à première vue les réseaux B et C semblent semblables, mais en fait ils sont différents puisque le nombre de transmetteurs et de récepteurs dans les arbres de fibres optiques sont différents. La Figure

5.35 montre le ratio moyen d'utilisation des canaux (*networktreeUtil*) sur l'ensemble des tous les arbres de fibres optiques, une mesure connue globalement par le simulateur, en fonction du ratio d'utilisation pour les six réseaux. La Figure 5.36 montre le ratio d'utilisation des canaux par chaque connexion (*linkUtil*) qui est connue par le plan de contrôle de chacun des nœuds et moyennée sur tout le réseau en fonction du ratio d'utilisation pour les six réseaux. Le trafic normalisé à chacun des nœuds (*nodeTraffic*) en fonction du ratio d'utilisation pour chacun des multiples de trafic est présenté à la Figure 5.37.

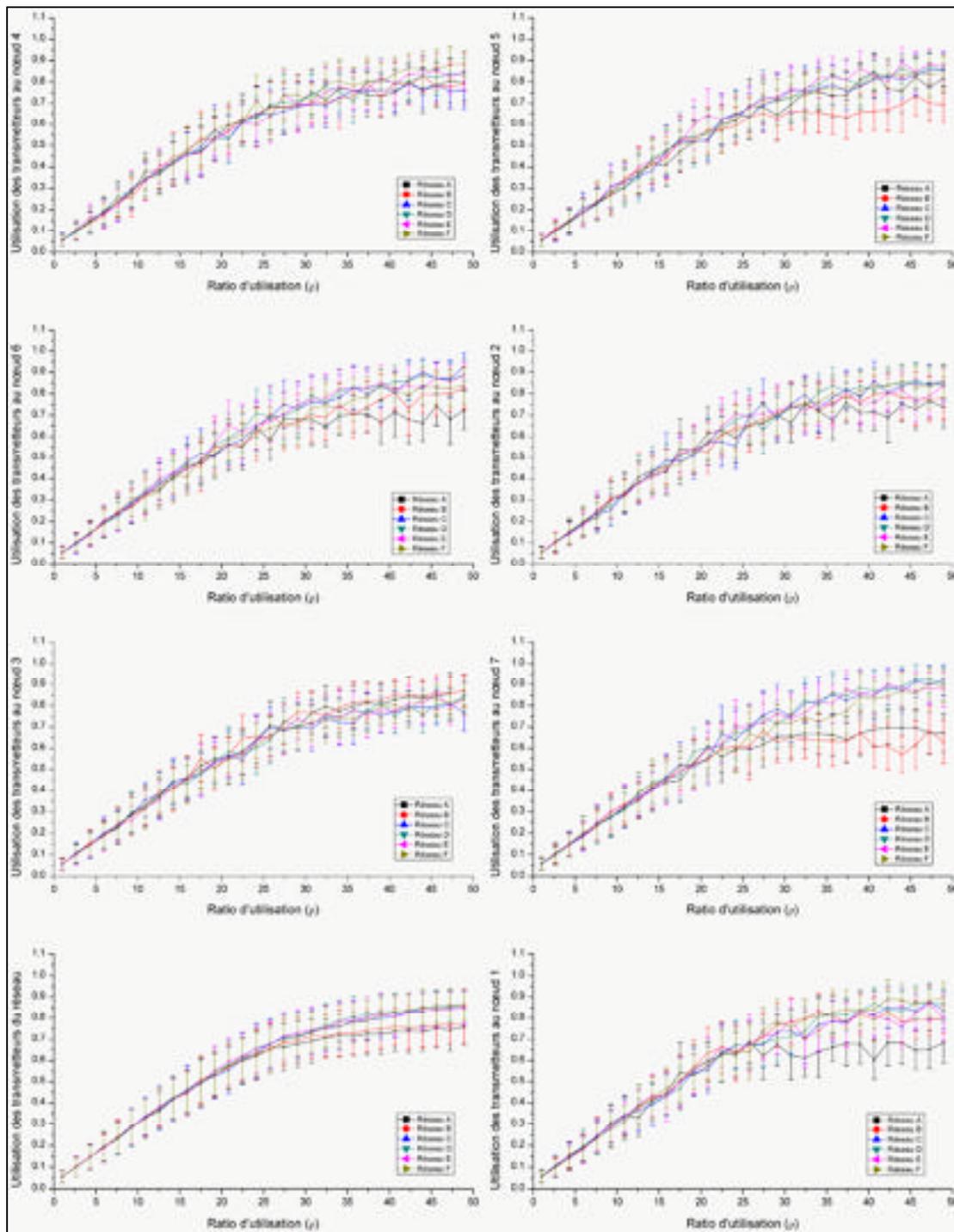


Figure 5.32 Le ratio d'utilisation moyen des transmetteurs à chacun des nœuds et du réseau entier en fonction du ratio d'utilisation pour les six solutions du réseau allemand à 7 nœuds, tel que défini par l'équation (4.11) du mémoire

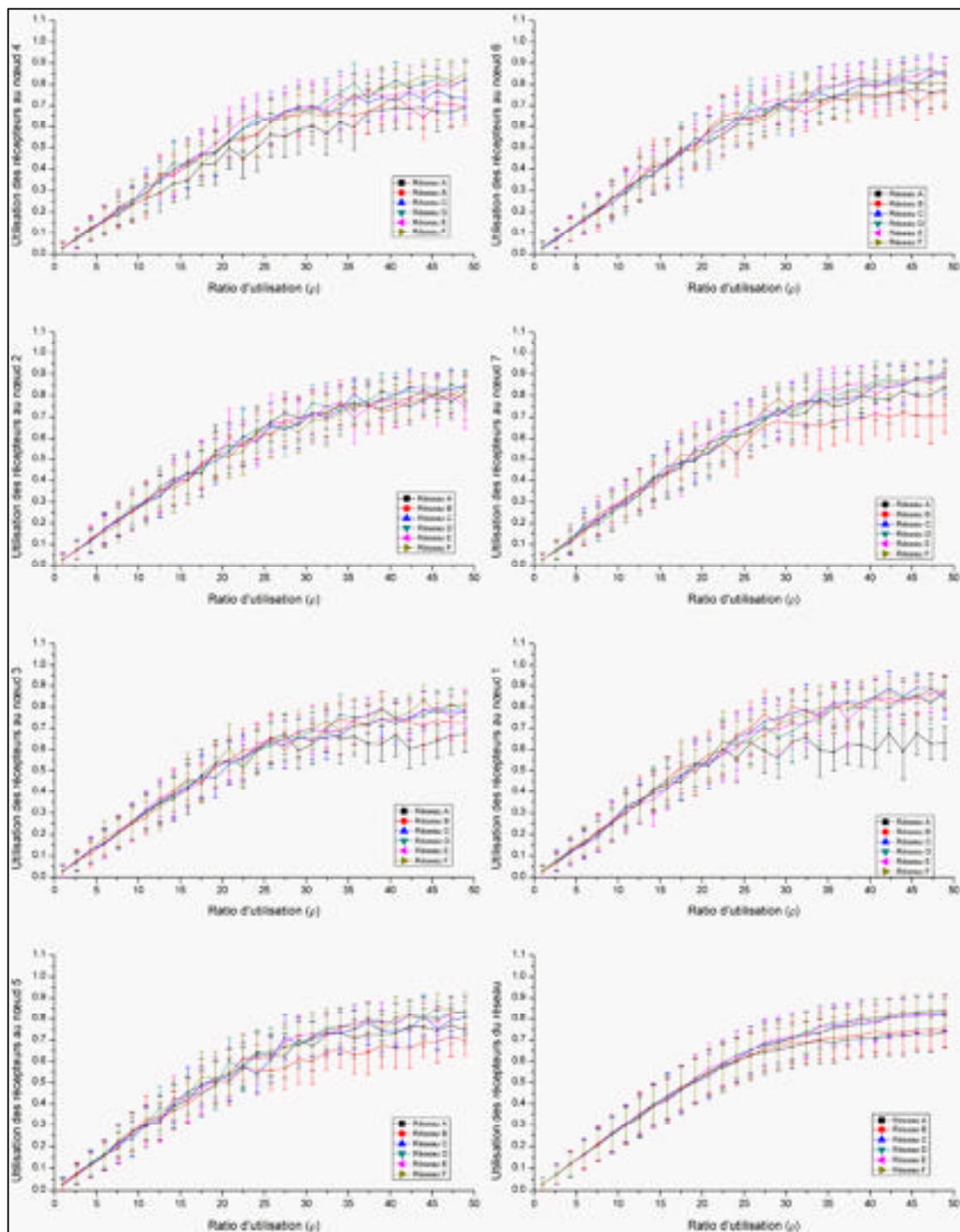


Figure 5.33 Le ratio d'utilisation moyen des récepteurs à chacun des nœuds et du réseau entier en fonction du ratio d'utilisation pour les six solutions du réseau allemand à 7 nœuds, tel que défini par l'équation (4.12) du mémoire

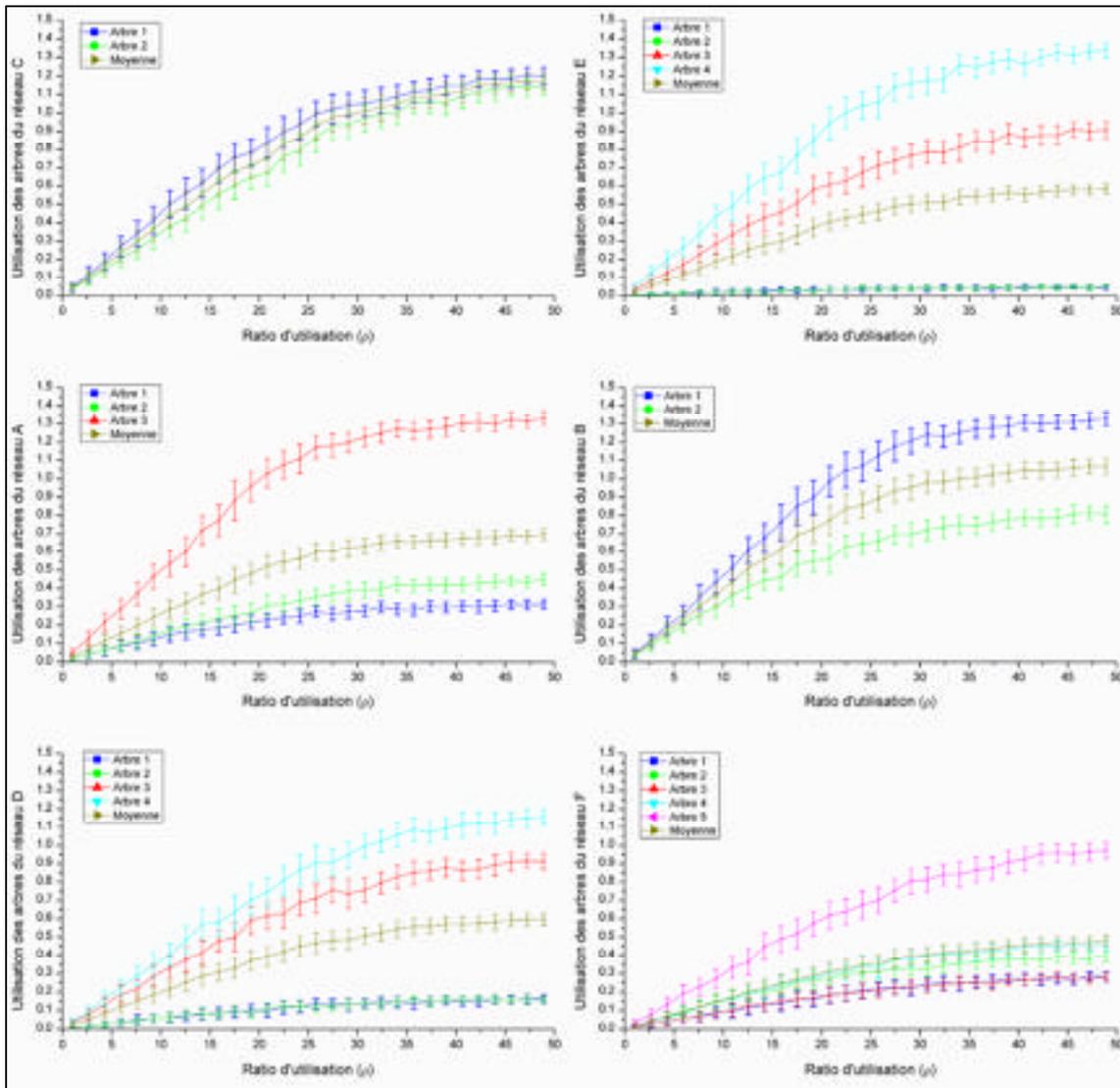


Figure 5.34 Le ratio d'utilisation des canaux (*treeUtil*) pour chaque arbre de fibres optiques avec couleurs correspondant à celles de la Figure 5.24 en fonction du ratio d'utilisation pour les six solutions du réseau allemand à 7 nœuds

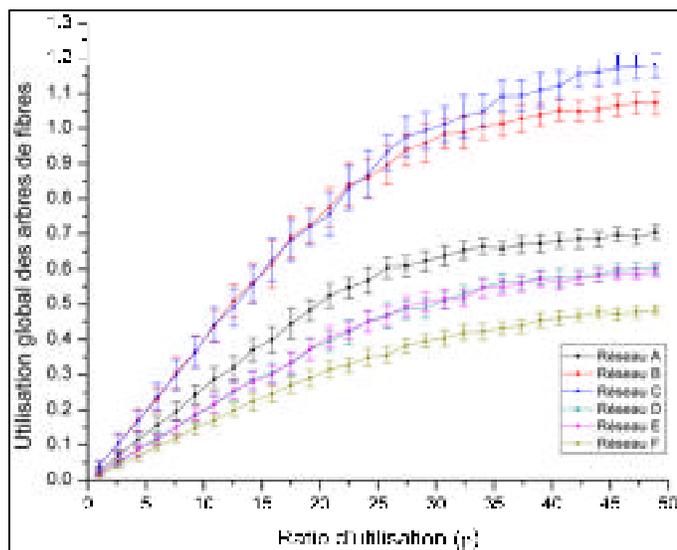


Figure 5.35 L'utilisation moyenne des canaux (*networktreeUtil*) exprimé en ratio par rapport au nombre total de canaux disponible sur tous les arbres de fibres optiques en fonction du ratio d'utilisation pour les six solutions du réseau allemand à 7 nœuds

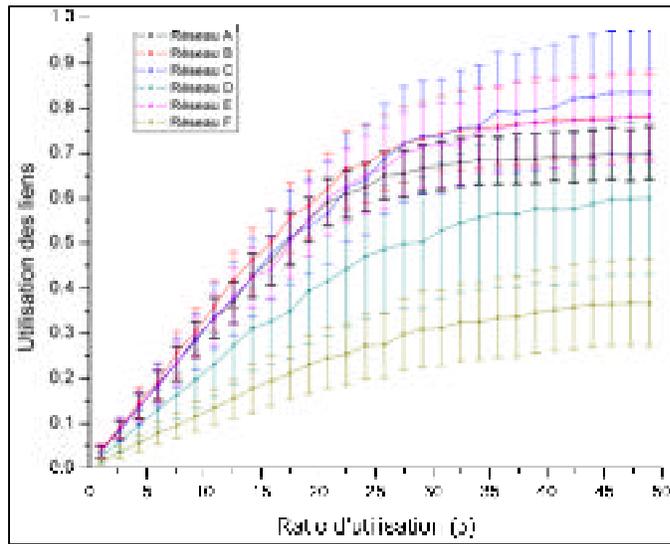


Figure 5.36 L'utilisation moyenne des canaux par chaque connexion (*linkUtil*) connue par le plan de contrôle de chacun des nœuds et moyennée sur tout le réseau en fonction du ratio d'utilisation pour les six solutions du réseau allemand à 7 nœuds

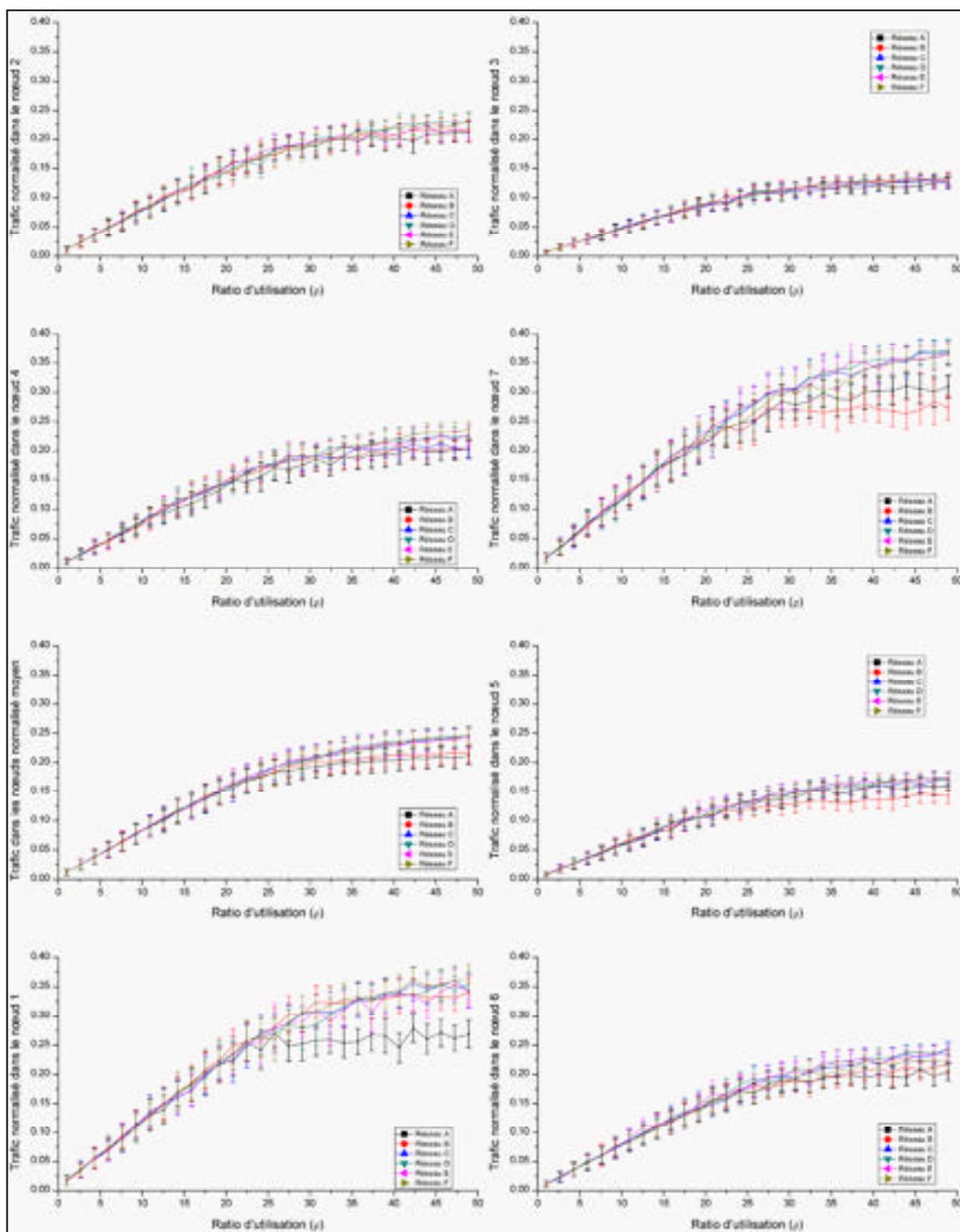


Figure 5.37 Le trafic normalisé à chacun des nœuds (*nodeTraffic*) en fonction du ratio d'utilisation pour les six solutions du réseau allemand à 7 nœuds

Pareillement à la section précédente, les résultats précédents ne tenaient compte que des ressources physiquement disponibles. La Figure 5.38 montre le même BER moyen exprimé en $(-10 \log_{10}(\text{BER}))$ avec l'écart-type correspondant avant le FEC pendant la durée des connexions en fonction du ratio d'utilisation pour les six solutions. On peut encore y voir clairement que, plus le ratio d'utilisation augmente, meilleur est le BER. Si l'on classifie ces six solutions à taux bas de ratio d'utilisation, elles sont, dans l'ordre, selon le meilleur BER: A, F, B, E, D, et C. À taux élevé, elles deviennent F, D, C, A, E et B.

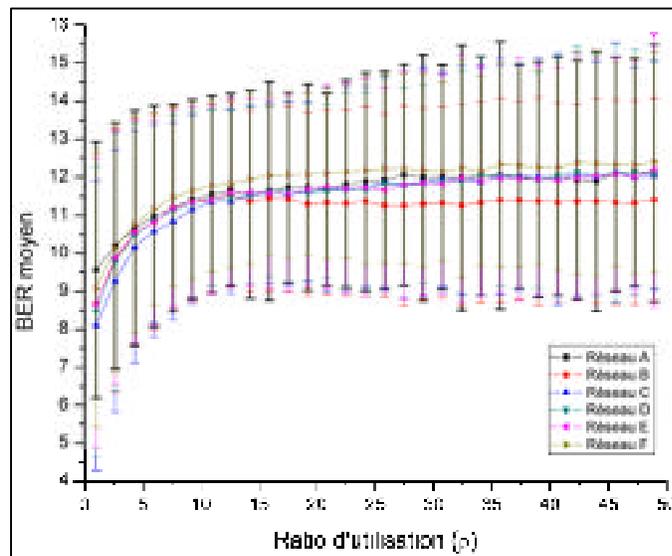


Figure 5.38 BER avant FEC pour les canaux de données en fonction du ratio d'utilisation pour les six solutions du réseau allemand à 7 nœuds. Le BER est exprimé par $-10 \log_{10}(\text{BER})$

Les figures 5.39-5.41 représentent la probabilité de blocage pour un BER post-FEC supérieur respectivement à 10^{-6} à 10^{-9} et 10^{-12} , pour les canaux de données en fonction du ratio d'utilisation pour les six solutions. Aux taux élevés de ratio d'utilisation, il manque de statistiques, mais une moyenne a été effectuée, de $\rho = 35.7 \dots 48.9$, dans les analyses qui suivent.

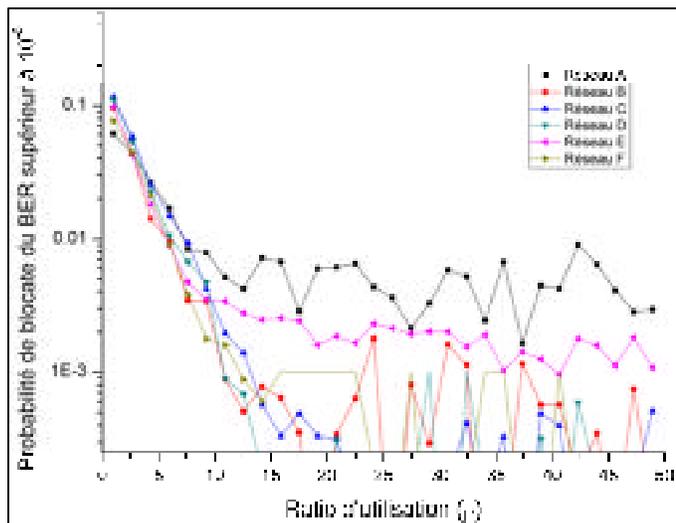


Figure 5.39 Probabilité de blocage pour un BER après FEC supérieur à 10^{-6} pour les canaux de données en fonction du ratio d'utilisation pour les six solutions du réseau allemand à 7 nœuds

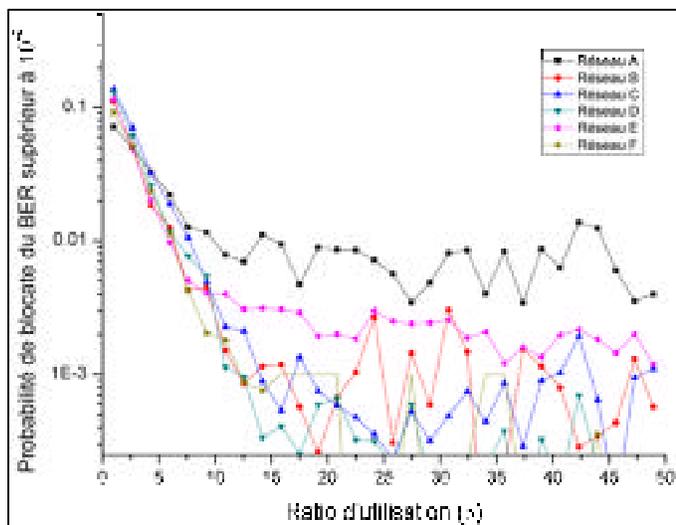


Figure 5.40 Probabilité de blocage pour un BER après FEC supérieur à 10^{-9} pour les canaux de données en fonction du ratio d'utilisation pour les six solutions du réseau allemand à 7 nœuds

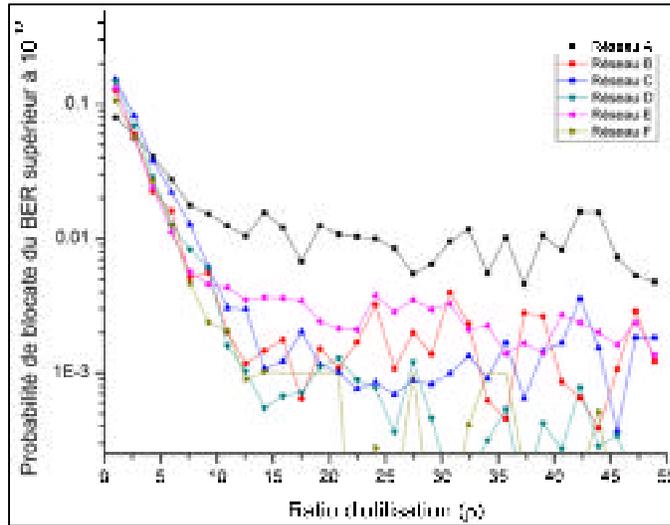


Figure 5.41 Probabilité de blocage pour un BER après FEC supérieur à 10^{-12} pour les canaux de données en fonction du ratio d'utilisation pour les six solutions du réseau allemand à 7 nœuds

Le Tableau 5.13 montre la comparaison des paramètres globaux du réseau pour chacun des multiples de trafic à un ratio d'utilisation faible ($\rho=1$) tandis que le Tableau 5.16 montre cette comparaison pour un ratio d'utilisation élevé ($\rho=48.9$).

Les tableaux 5.14 et 5.17 montrent respectivement la probabilité de blocage, à un BER après FEC supérieur à 10^{-6} , à 10^{-9} et à 10^{-12} , pour chacun des multiples de trafic, à un ratio d'utilisation faible et un ratio d'utilisation élevé (moyenne de $\rho=35.7\dots48.9$). Au-dessus d'un certain seuil, la performance de la couche physique est meilleure lorsqu'on a un plus grand nombre d'arbres de fibres optiques pour former le réseau. Cette performance est liée à une interdépendance entre la longueur moyenne des arbres de fibres optiques et le nombre de combinaison de branches produisant l'effet entonnoir du bruit.

Le Tableau 5.18 montre le ratio d'utilisation du réseau, le trafic moyen dans le réseau, la probabilité de blocage par non disponibilité de transmetteurs, la probabilité de blocage par

non disponibilité de récepteurs et la probabilité de blocage par non disponibilité de canal lorsque la probabilité de blocage total de 2% est atteinte pour chacune des six solutions. Encore une autre fois, cette valeur de 2% a été choisie arbitrairement; elle dépend des spécifications des clients pour respecter l'accord sur le niveau de service (SLA).

Finalement, les tableaux 5.15 et 5.19 montrent le classement des réseaux avec les multiples de trafic selon le paramètre global à un ratio d'utilisation faible ($\rho=1$) et à un ratio d'utilisation élevé ($\rho=48.9$).

Tableau 5.13 Comparaison des paramètres globaux du réseau pour les six solutions du réseau allemand à 7 nœuds à un ratio d'utilisation **faible** ($\rho=1$)

Matrice de trafic	Trafic du réseau				Trafic normalisé à chacun des nœuds et moyenné sur tout le réseau				Ratio d'utilisation des récepteurs				Ratio d'utilisation des transmetteurs			
	Moyenne	Déviati on standard	Min	Max	Moyenne	Déviati on standard	Min	Max	Moyenne	Déviati on standard	Min	Max	Moyenne	Déviati on standard	Min	Max
A	7.07	2.57	0.00	17.00	0.0120	0.0055	0.0040	0.0330	0.0277	0.0274	0.0000	0.1468	0.056	0.027	0.028	0.175
B	7.08	2.62	0.00	18.00	0.0120	0.0056	0.0040	0.0313	0.0283	0.0277	0.0000	0.1389	0.055	0.027	0.028	0.171
C	7.15	2.68	0.00	19.00	0.0121	0.0056	0.0040	0.0350	0.0284	0.0286	0.0000	0.1627	0.056	0.027	0.028	0.175
D	7.08	2.63	0.00	19.00	0.0122	0.0057	0.0040	0.0345	0.0289	0.0283	0.0000	0.1508	0.056	0.028	0.028	0.175
E	7.09	2.56	0.00	17.00	0.0121	0.0056	0.0040	0.0330	0.0282	0.0277	0.0000	0.1548	0.056	0.028	0.028	0.171
F	7.00	2.81	0.00	20.00	0.0120	0.0058	0.0040	0.0376	0.0277	0.0282	0.0000	0.1667	0.056	0.028	0.028	0.175
	Ratio d'utilisation des liens				Ratio d'utilisation des arbres de fibres optiques				Latence				BER avant la FEC			
	Moyenne	Déviati on standard	Min	Max	Moyenne	Déviati on standard	Min	Max	Moyenne	Déviati on standard	Min	Max	Moyenne	Déviati on standard	Min	Max
A	0.0357	0.0125	0.0024	0.0799	0.0268	0.0097	0.0000	0.0644	1.897	0.921	0.569	3.783	9.56	3.37	0.33	17.48
B	0.0385	0.0138	0.0028	0.0911	0.0402	0.0149	0.0000	0.1023	2.079	1.240	0.569	5.640	8.68	3.91	0.32	18.52
C	0.0365	0.0140	0.0028	0.0999	0.0406	0.0152	0.0000	0.1080	1.802	0.791	0.569	3.435	8.11	3.80	0.32	18.10
D	0.0253	0.0118	0.0006	0.0696	0.0201	0.0075	0.0000	0.0540	2.007	1.133	0.569	4.847	8.48	3.80	0.32	17.44
E	0.0363	0.0137	0.0002	0.0920	0.0202	0.0073	0.0000	0.0483	2.042	1.161	0.569	4.847	8.66	3.79	0.32	17.40
F	0.0149	0.0074	0.0013	0.0472	0.0159	0.0064	0.0000	0.0455	1.971	1.103	0.569	5.214	9.07	3.65	0.32	17.42

Tableau 5.14 Probabilité de blocage due à respectivement un BER après FEC supérieur à 10^{-6} , à 10^{-9} et à 10^{-12} pour les six solutions du réseau allemand à 7 nœuds à un ratio d'utilisation **faible** ($\rho=1$)

Matrice de trafic	Probabilité de blocage du au BER après la FEC		
	10^{-6}	10^{-9}	10^{-12}
A	6.10%	7.15%	7.97%
B	9.65%	11.08%	12.59%
C	11.63%	13.68%	15.34%
D	11.13%	13.10%	14.65%
E	9.85%	11.55%	13.18%
F	7.67%	9.16%	10.63%

Tableau 5.15 Classement des six solutions du réseau allemand à 7 nœuds selon le paramètre global à un ratio d'utilisation faible ($\rho = 1$)

Classement	Trafic du réseau	Trafic normalisé à chacun des nœuds et moyenné sur tout le réseau	Ratio d'utilisation des récepteurs	Ratio d'utilisation des transmetteurs	Ratio d'utilisation des liens	Ratio d'utilisation des arbres de fibres optiques	Latence	BER avant la FEC	Probabilité de blocage du au BER après la FEC (10^{-9})
1	F	D	D	A	F	F	C	A	A
2	A	E	C	C	D	D	A	F	F
3	B	C	B	D	A	E	D	B	B
4	D	F	E	F	E	A	D	E	E
5	E	B	F	E	C	B	E	D	D
6	C	A	A	B	B	C	B	C	C

Tableau 5.16 Comparaison des paramètres globaux des six solutions du réseau allemand à 7 nœuds à un ratio d'utilisation élevé ($\rho = 49$)

Matrice de trafic	Trafic du réseau				Trafic normalisé à chacun des nœuds et moyenné sur tout le réseau				Ratio d'utilisation des récepteurs				Ratio d'utilisation des transmetteurs			
	Moyenne	Déviati on standard	Min	Max	Moyenne	Déviati on standard	Min	Max	Moyenne	Déviati on standard	Min	Max	Moyenne	Déviati on standard	Min	Max
A	185.78	5.36	166	201	0.2118	0.0154	0.1664	0.2497	0.7381	0.0755	0.5278	0.9167	0.758	0.086	0.520	0.968
B	188.79	5.72	168	205	0.2170	0.0159	0.1724	0.2573	0.7489	0.0834	0.5357	0.9444	0.769	0.089	0.516	0.964
C	207.61	6.18	190	222	0.2413	0.0167	0.1922	0.2801	0.8217	0.0793	0.5913	0.9881	0.847	0.080	0.583	0.992
D	212.03	5.91	193	225	0.2459	0.0157	0.1924	0.2817	0.8411	0.0775	0.6071	0.9960	0.863	0.076	0.595	1.000
E	208.64	5.50	188	226	0.2418	0.0165	0.1905	0.2792	0.8296	0.0845	0.5674	1.0000	0.850	0.081	0.579	1.000
F	211.96	6.16	188	232	0.2462	0.0162	0.1971	0.2813	0.8411	0.0773	0.6151	0.9960	0.863	0.076	0.615	1.000
	Ratio d'utilisation des liens				Ratio d'utilisation des arbres de fibres optiques				Latence				BER avant la FEC			
	Moyenne	Déviati on standard	Min	Max	Moyenne	Déviati on standard	Min	Max	Moyenne	Déviati on standard	Min	Max	Moyenne	Déviati on standard	Min	Max
A	0.7010	0.0578	0.5363	0.7511	0.7037	0.0203	0.6288	0.7614	2.0831	1.0771	0.5690	5.9884	12.0168	3.1887	1.8575	59.746
B	0.7808	0.0951	0.5074	0.8628	1.0726	0.0325	0.9545	1.1650	2.2352	1.2753	0.5690	6.9929	11.3703	2.6528	1.6167	43.089
C	0.8350	0.1393	0.4399	0.9414	1.1797	0.0352	1.0800	1.2610	1.9477	0.9354	0.5690	4.6703	12.0263	3.1101	2.2111	51.261
D	0.6005	0.1685	0.2431	0.7831	0.6024	0.0168	0.5483	0.6392	2.1114	1.1790	0.5690	4.8467	12.0509	3.1102	2.0203	45.480
E	0.7835	0.1015	0.5719	0.8888	0.5927	0.0156	0.5341	0.6420	2.1226	1.1583	0.5690	5.4053	12.0026	3.1296	0.5926	43.975
F	0.3674	0.0967	0.1962	0.5048	0.4817	0.0140	0.4273	0.5273	2.0417	1.1032	0.5690	5.2142	12.3221	2.7714	2.4513	38.693

Tableau 5.17 Probabilité de blocage due à respectivement un BER après FEC supérieur à 10^{-6} , à 10^{-9} et à 10^{-12} pour les six solutions du réseau allemand à 7 nœuds à un ratio d'utilisation élevé ($\rho = 49$)

Matrice de trafic	Probabilité de blocage due au BER après la FEC		
	10^{-6}	10^{-9}	10^{-12}
A	0.47%	0.74%	0.91%
B	0.04%	0.07%	0.14%
C	0.02%	0.09%	0.16%
D	0.01%	0.02%	0.03%
E	0.13%	0.16%	0.19%
F	0.01%	0.01%	0.01%

Tableau 5.18 Le ratio d'utilisation du réseau, le trafic moyen dans le réseau, la probabilité de blocage par non disponibilité de transmetteur, la probabilité de blocage par non disponibilité de récepteur et la probabilité de blocage par non disponibilité de canal lorsque la probabilité de blocage total de 2% est atteint pour les six solutions du réseau allemand à 7 nœuds

Matrice de trafic	Ratio d'utilisation (BP \geq 2%)	Trafic moyen	Probabilité de blocage (transmetteur)	Probabilité de blocage (récepteur)	Probabilité de blocage (lambda)
A	12.57	84.15	0.080%	2.122%	0.000%
B	15.87	107.84	0.464%	1.658%	0.000%
C	19.17	126.26	0.690%	1.870%	0.000%
D	19.17	130.90	1.074%	1.088%	0.000%
E	19.17	131.40	0.690%	1.486%	0.000%
F	15.87	108.18	0.783%	1.114%	0.000%

Tableau 5.19 Classement des six solutions du réseau allemand à 7 nœuds selon le paramètre global à un ratio d'utilisation élevé ($\rho = 49$)

Classement	Trafic du Réseau	Trafic normalisé à chacun des nœuds et moyenné sur tout le réseau	Ratio d'utilisation des récepteurs	Ratio d'utilisation des transmetteurs	Ratio d'utilisation des liens	Ratio d'utilisation des arbres de fibres optiques	Latence	BER avant la FEC	Probabilité de blocage du au BER après la FEC (10^{-9})	Blocage total (BP \geq 2%)
1	D	F	F	F	F	F	C	F	F	E
2	F	D	D	D	D	E	F	D	D	D
3	E	E	E	E	A	D	A	C	B	C
4	C	C	C	C	B	A	D	A	C	F
5	B	B	B	B	E	B	E	E	E	B
6	A	A	A	A	C	C	B	B	A	A

Si l'on donne un poids égal à chacune des catégories, de façon globale et lors d'un plan de contrôle qui minimise les latences, nous concluons qu'à un taux faible d'utilisation les meilleures solutions en performance dynamique des réseaux sont par ordre croissant: A, D, B, E, C et F. Alors qu'à un taux élevé d'utilisation, elles sont: F, D, E, C, B et A, ce qui est inversement proportionnel aux taux de protection.

CONCLUSION

Le simulateur de réseau sans filtre a été démontré comme étant un outil puissant pour comprendre le comportement dynamique de cette nouvelle architecture. Il permet le développement et l'évaluation de plans de contrôle tenant compte des limitations de la couche physique. Le plan de contrôle exposé dans ce mémoire servira de base pour comparer tout nouveau plan de contrôle qui sera développé dans le futur. Les résultats obtenus avec le réseau allemand à 7 nœuds ont démontré l'influence de la topologie des arbres de fibres optiques ainsi que des matrices de trafic pour un plan de contrôle qui minimise les latences.

Le simulateur permet donc la validation dynamique des solutions réseau sans filtre découlant des algorithmes de créations des arbres de fibres optiques, ainsi que l'allocation optimale statique des longueurs d'onde.

Il a été démontré que, financièrement, le réseau JOCN allemand à 7 nœuds est limité à une matrice de trafic six fois plus élevée que la matrice de trafic unitaire. Cette limitation est imposée par l'épuisement des canaux disponibles dans les arbres de fibres optiques et elle correspond au nombre de canaux nécessaires pour la solution statique lorsqu'elle dépasse 88 canaux. Aussi, plus le réseau a un nombre élevé de transmetteurs et de récepteurs, plus la probabilité de blocage est faible, jusqu'à la limite du nombre de canaux dans la fibre optique. Une autre conclusion que l'on peut tirer est que, plus grand est le nombre d'arbres de fibres optiques accessibles au nœud et plus grand est son degré, plus la probabilité de blocage est faible, permettant une plus grande résilience aux fluctuations du trafic dans le réseau.

Les simulations permettent de garantir la performance en termes de probabilité de blocage du réseau lors de l'établissement d'accords sur les niveaux de service. Elles permettent aussi de déterminer les endroits dans le réseau où plus ou moins de ressources sont nécessaires et d'évaluer comment l'allocation de différentes ressources peut influencer les performances.

Ces simulations permettent donc d'identifier les endroits dans le réseau où il y a un surdimensionnement ou encore un sous-dimensionnement dans le cas de trafic dynamique. Le plan de contrôle utilisé a une grande influence sur les performances. **Ces résultats serviront donc de conditions de base pour une analyse comparative de différents plans de contrôle.**

Nous avons vu que, plus le ratio d'utilisation augmente, donnant plus de trafic dans le réseau, meilleur est le BER puisque les EDFA ont un meilleur OSNR lorsqu'ils sont plus chargés en canaux et en puissance d'entrée totale. Ceci découle de la caractérisation des amplificateurs optiques utilisés. Aussi, lorsque le réseau est dimensionné pour un multiple de matrice de trafic plus grand, au même ratio d'utilisation, le BER devient moins bon. Cette dégradation du BER se produit car l'OSNR plus bas provient d'un plus grand gain nécessaire pour amplifier le signal avant et après les étages des coupleurs plus nombreux. Ce fait supporte le besoin d'un plan de contrôle intelligent qui minimise en priorité la possibilité d'avoir un BER au-dessus d'un seuil, par-dessus les autres métriques telles que la latence qui deviennent secondaires.

Dans le classement au niveau de la performance dynamique du réseau JOCN (Figure 5.1) avec différents multiples de matrice de trafic unitaire, la performance dynamique est bien représentée par le nombre de canaux que peuvent supporter les arbres de fibres optiques. Ce nombre impose une limite à partir de laquelle le coût augmente plus rapidement pour un plus grand multiple de matrice de trafic unitaire. À un ratio d'utilisation faible, la capacité en trafic des différentes solutions sans filtre est essentiellement la même, mais, à un taux élevé, la capacité maximale d'un réseau est directement corrélée avec le nombre minimum de longueurs d'onde pour satisfaire les connexions en régime statique. Les latences moyennes des différentes solutions comportent toutes une transition entre un régime à plus basse latence moyenne et un régime à plus haute latence moyenne; plus le nombre d'arbres est petit, plus grand est l'écart de magnitude de cette transition. Évidemment, ces latences moyennes sont directement proportionnelles aux longueurs moyennes des demandes de chaque solution.

Afin d'augmenter la performance de la couche physique, une assignation intelligente pour garder les meilleures longueurs d'onde pour les plus grandes distances serait bénéfique. Il sera intéressant d'évaluer le trafic maximal atteint dans ce cas.

Une direction de développement possible afin de rendre le simulateur complet est l'ajout de la dynamique des amplificateurs (effets transitoires) lors de l'ajout ou de l'extraction de longueurs d'onde ou encore d'un bris, dans le but d'étudier la dynamique sur le BER. Aussi, l'ajout de la diaphonie entre les canaux pourrait être intéressant à explorer dans de prochains travaux, car elle aussi a une influence sur le BER et, dans le cas de détection cohérente, elle est vue comme du bruit par les photorécepteurs.

Une caractérisation de système avec différents formats de modulation tels que DP-QPSK, ainsi que de DP-16-QAM comme il existe dans les systèmes de Ciena, est envisagée. Aussi, une étude de l'impact sur les latences des réseaux sans filtre d'une variation du FEC en fonction du BER est une autre avenue à explorer. L'ajout de bloqueurs de longueurs d'onde pourrait être aussi souhaitable pour obtenir une meilleure efficacité dans l'utilisation des longueurs d'onde.

Afin d'augmenter le réalisme du simulateur, il faudra ajouter des filtres fixes aux amplificateurs optiques et des filtres à courbe spectrale de gain dynamique (DGFF) à tous les quatre ou cinq sites d'amplification comme c'est le cas en pratique sur le terrain.

Finalement, cette étude doit être faite pour différentes topologies de réseau telles que celles présentées dans (Archambault et al., 2010), soient le réseau italien à 10 nœuds et le réseau allemand à 17 nœuds. Il faudrait aussi voir comment les conclusions de ce mémoire s'appliquent à d'autres topologies des réseaux. Comme mentionné précédemment, les simulations ont été faites avec une distribution de Poisson pour le trafic. Pour représenter le trafic de manière plus réaliste, une étude devra aussi être faite avec une distribution de trafic

par rafales de nature auto-similaire avec une dépendance à long terme (Gumaste et Antony, 2003) ou encore tout autre distribution avec une dépendance à long terme.

APPENDICES

Tableau A.1 Base de données de la connectivité optique du réseau dans un nœud et découlant de la découverte de la topologie

Nœud d'origine	Nœud Destinataire	Port optique d'origine	Port optique destinataire	Identité du message	Latence (ms)
Arbre de fibres #1					
2	8	2	0	3	0.60
2	11	2	2	3	1.87
8	11	3	2	26	1.28
7	11	1	2	45	2.06
8	2	0	2	23	0.60
7	2	1	2	45	1.37
7	8	1	1	45	0.78
Arbre de fibres #2					
5	3	1	3	9	0.19
Arbre de fibres #3					
11	15	0	2	10	1.36
1	15	0	2	41	2.22
7	15	2	2	46	3.72
11	6	2	1	12	2.83
11	8	2	3	12	1.28
8	6	4	1	27	1.56
15	6	2	1	31	4.19
15	8	2	3	31	2.64
15	11	2	0	31	1.36
1	6	0	1	41	3.69
1	8	0	3	41	2.14
1	11	0	3	41	0.86
7	6	2	1	46	5.19
7	8	2	3	46	3.65
7	11	2	3	46	2.37
7	1	2	2	46	1.52
Arbre de fibres #4					
11	1	3	0	13	0.86
11	7	3	2	13	2.37
1	7	2	2	43	1.52
Arbre de fibres #5					
17	13	1	0	15	0.72
Arbre de fibres #6					
8	7	1	1	24	0.78
6	7	1	1	33	2.33
6	8	1	4	33	1.56
Arbre de fibres #7					
13	17	0	1	37	0.72
Arbre de fibres #8					
3	5	3	1	50	0.19

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Archambault, É., D. O'Brien, C. Tremblay, F. Gagnon, M. Bélanger et É Bernier. 2010. « Design and Simulation of Filterless Optical Networks: Problem Definition and Performance Evaluation ». *Optical Communications and Networking, IEEE/OSA Journal of*, vol. PP, n° 99, p. 496-501.
- Baroni, S., et P. Bayvel. 1997. « Wavelength requirements in arbitrarily connected wavelength-routed optical networks ». *Lightwave Technology, Journal of*, vol. 15, n° 2, p. 242-251.
- Bernstein, Greg, Bala Rajagopalan et Debanjan Saha. 2004. *Optical Network Control: Architecture, Protocols, and Standards*. Boston: Addison Wesley Professional.
- Bertsekas, Dimitri P., et Robert G. Gallager. 1987. *Data networks*. Prentice-Hall.
- Binh, Le Nguyen, Nguyne Minh Hoang, Zheng Wu, Charles Cieutat et Ahmet Sekergioğlu. 2003. « Routing and wavelength assignment in GMPLS-based DWDM optical networks ». *Proceedings of SPIE*, vol. 5247, n° 1, p. 393-402.
- Chan, Calvin C. K. 2010. *Optical Performance Monitoring: Advanced Techniques for Next-Generation Photonic Networks*. Academic Press.
- Chava, V. S., E. Salvadori, A. Zanardi, A. Francescon, G. Galimberti, G. Martinelli, R. Pastorelli, E. S. Vercelli, A. Tanzi et D. L. Fauci. 2010. « Toward deployment of signalling-based approach for linear and non-linear impairment-aware lightpath setup in transparent optical networks ». *Communications Letters, IEEE*, vol. 14, n° 3, p. 254-256.
- Chava, V. S., E. Salvadori, A. Zanardi, G. Galimberti, G. Martinelli, R. Pastorelli, E. S. Vercelli, A. Tanzi et D. La Fauci. 2009. « Novel signalling based approach for handling linear and non-linear impairments in transparent optical networks ». In., p. 1-7. < 10.4108/ICST.BROADNETS2009.7222 >.
- Chen, Jiajia, Sahar Khanmohamadi, Farzad Abtahi, Lena Wosinska, Zhenyu Xu, Andrew Cassidy, Christine Tremblay, Paul Littlewood, Serge Asselin et Michel P. Belanger. 2011. « Passive wide area network solutions: Filterless and semi-filterless optical networks ». In *Transparent Optical Networks (ICTON), 2011 13th International Conference on* p. 1-1. IEEE.

- Cieutat, Charles, et Le Nguyen Binh. 2003. *Routing and Wavelength Assignment in GMPLS-based DWDM Optical Networks: An OMNeT++ modelling Platform*. Coll. « Technical Report ». Australia: Monash University.
- « Columbia University Lightwave Research Laboratory ». < <http://lightwave.ee.columbia.edu/?s=research&p=phoenixsim> >.
- Cugini, F., N. Sambo, N. Andriolli, A. Giorgetti, L. Valcarenghi, P. Castoldi, E. Le Rouzic et J. Poirrier. 2008. « Enhancing GMPLS Signaling Protocol for Encompassing Quality of Transmission (QoT) in All-Optical Networks ». *Lightwave Technology, Journal of*, vol. 26, n° 19, p. 3318-3328.
- Goldfarb, Gilad. 2008. « Digital signal processing techniques for coherent optical communication ». Doctor of Philosophy in Optics. Orlando, Florida, University of Central Florida, 118 p. < <http://www.proquest.com> >.
- Gumaste, Ashwin, et Tony Antony. 2003. *DWDM Network Designs and Engineering Solutions*. Coll. « Cisco Press ». Indianapolis.
- Hui, Rongqing, et Maurice S. O'Sullivan. 2009. *Fiber Optic Measurement Techniques*. Amsterdam ; London: Elsevier/Academic Press.
- ITU, Telecommunication Standardization Sector of. 2000. *Forward error correction for submarine systems*
- ITU, Telecommunication Standardization Sector of. 2002. *Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid*.
- ITU, Telecommunication Standardization Sector of. 2010. *Definitions and test methods for linear, deterministic attributes of single-mode fibre and cable*.
- Kametani, Soichiro, Takashi Sugihara, Tatsuya Kobayashi, Kazuumi Koguchi et Takashi Mizuochi. 2011. « Low Latency Transmission at 40 Gbps by Employing Electronic Pre-equalization Technology ». In., p. OThE2-OThE2. Optical Society of America. < <http://www.opticsinfobase.org/abstract.cfm?URI=OFC-2011-OThE2> >.
- Kartalopoulos, Stamatios V. 2003. *DWDM : networks, devices, and technology*. Piscataway, N.J.: Piscataway, N.J. : IEEE Press ; Hoboken, N.J. : Wiley-Interscience.
- Keiser, Gerd. 2000. *Optical fiber communications*. McGraw-Hill.
- Kumar, Shiva. 2011. *Impact of Nonlinearities on Fiber Optic Communications*, 7. Coll. « Optical and Fiber Communications Reports ». Springer.

- Li, T., L. Berger, D. Gan, D. Awduche, V. Srinivasan et G. Swallow. 2001. *RSVP-TE: Extensions to RSVP for LSP Tunnels*. The Internet Society. < <http://tools.ietf.org/html/rfc3209> >.
- Mukherjee, Biswanath. 2006. *Optical WDM networks*. New York: Springer.
- Mynbaev, Djafar K., et Lowell L. Scheiner. 2000. *Fiber-Optic Communications Technology*. Prentice Hall.
- « OMNeT++ ». < <http://www.omnetpp.org/> >.
- Patil, Suvarna S., Bharat S. Chaudhari et Baojun Li. 2010. « Analysis of crosstalk and modeling of possible number of routing stages for optically transparent wavelength-division multiplexing nodes of generalized multiprotocol label-switched networks ». *Optical Engineering*, vol. 49, n° 11, p. 115001-115001.
- Qian, Yu, et Fan Chongcheng. 1999. « Simple dynamic model of all-optical gain-clamped erbium-doped fiber amplifiers ». *Lightwave Technology, Journal of*, vol. 17, n° 7, p. 1166-1171.
- Roberts, K., M. O'Sullivan, Wu Kuang-Tsan, Sun Han, A. Awadalla, D. J. Krause et C. Laperle. 2009. « Performance of Dual-Polarization QPSK for Optical Transport Systems ». *Lightwave Technology, Journal of*, vol. 27, n° 16, p. 3546-3559.
- Saleh, Bahaa, et Malvin Carl Teich. 2007. *Fundamentals of photonics*, 2nd Edition. Coll. « Wiley series in pure and applied optics ». New York: Wiley.
- Saradhi, C. V., et S. Subramaniam. 2009. « Physical layer impairment aware routing (PLIAR) in WDM optical networks: issues and challenges ». *Communications Surveys & Tutorials, IEEE*, vol. 11, n° 4, p. 109-130.
- Savoie, J. P., C. Tremblay, D. V. Plant et M. P. Bélanger. 2010. « Physical layer validation of Filterless optical networks ». In *Optical Communication (ECOC), 2010 36th European Conference and Exhibition on*. p. 1-3.
- Sivalingam, Krishna M., et Suresh Subramaniam. 2005. *Emerging Optical Network Technologies - Architectures, Protocols and Performance*. SpringerLink.
- Taylor, M. G. 2004. « Coherent detection method using DSP for demodulation of signal and subsequent equalization of propagation impairments ». *Photonics Technology Letters, IEEE*, vol. 16, n° 2, p. 674-676.

- Tremblay, Christine, François Gagnon, Benoît Châtelain, Éric Bernier et Michel P. Bélanger. 2007. « Filterless Optical Networks: A Unique and Novel Passive WAN Network Solution ». *12th Optoelectronics and Communications Conference and 16th International Conference on Integrated Optics and Optical Fiber Communication*.
- Yu, T., W. M. Reimer, V. S. Grigoryan et C. R. Menyuk. 2000. « A mean field approach for simulating wavelength-division multiplexed systems ». *Photonics Technology Letters, IEEE*, vol. 12, n° 4, p. 443-445.
- Zheng, J. 2006. « Efficient bandwidth allocation algorithm for ethernet passive optical networks ». *Communications, IEE Proceedings-*, vol. 153, n° 3, p. 464-468.
- Zyskind, John. 2011. *Optically Amplified WDM Networks*. Burlington: Elsevier/Academic Press.