HAL
open science

Étude des potentialités offertes par les technologies de transmission optique flexible pour les réseaux métro / coeur

Sofiene Blouza

To cite this version:

Sofiene Blouza. Étude des potentialités offertes par les technologies de transmission optique flexible pour les réseaux métro / coeur. Autre [cs.OH]. Université de Rennes, 2013. Français. NNT : 2013REN1S031 . tel-00870064

HAL Id: tel-00870064

https://theses.hal.science/tel-00870064v1

Submitted on 4 Oct 2013

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THÈSE / UNIVERSITÉ DE RENNES 1
sous le sceau de l'Université Européenne de Bretagne

pour le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE RENNES 1

Mention : Informatique

Ecole doctorale Matisse

présentée par

Sofiene BLOUZA

Préparée à l'IRISA

Etude des potentialités offertes par les technologies de transmission optiques flexibles pour les réseaux métro/cœur

Thèse soutenue à l'IRISA Rennes le 16/05/2013

Joanna TOMASIK
Professeur, SUPELEC/ *rapporteur*

Catherine LEPERS
Professeur, Telecom SudParis/ *rapporteur*

Jean-Louis ROUGIER
Maitre de conférence, Telecom Paristech/ *examinateur*

Gwillerm FROC
Ingénieur de recherche, Mitsubishi Electric R&D Centre Europe/ *examinateur*

Bernard COUSIN
Professeur, Université de Rennes 1/ *directeur de thèse*

Esther LE ROUZIC
Ingénieur de recherche, Orange Labs/ *co-directeur de thèse*

Nicolas BROCHIER, *Orange Labs/ Examinateur invité*

Remerciements

Mes premiers remerciements vont à Bernard Cousin, Esther le Rouzic et Nicolas Brochier pour m'avoir soutenu et encadré tout au long de ces années de thése.

Je souhaite remercier Maryse Guena et Ibrahim Houmed pour m'avoir accueilli au sein de leur unité de recherche.

J'adresse ma gratitude à Joanna Tomaik, Catherine Lepers, Jean-Louis Rougier, Gwillerm Froc, Bernard Cousin, Esther Le Rouzic et Nicolas Brochier pour avoir accepté de faire partie de mon jury de thèse.

Merci aux stagiaires, thésards et post doctorant d'Orange Networks et de l'Irisa : Ahmed Triki, Farah Moety, Ahmed Frikha, Jelena Pesic, Julie Karaki Ahmed Gmati, Wael Cherif, Dr. Cedric Gueguen, Dr. Hamza Drid...pour leur bonne humeur et les différents échanges que nous avons eu.

Je ne saurais oublier de remercier ma famille et particulièrement Sinda pour m'avoir accompagné au cours de ces années de thèse.

Résumé

L'évolution vers de nouveaux services, comme la TV à la demande, nécessitant de grosses bandes passantes remet en question les débits transportés par chaque canal optique d'un réseau WDM. Les débits des canaux ont atteint aujourd'hui les 100 Gbit/s. Cette montée en débit doit être accompagnée par de nouvelles fonctionnalités au sein des réseaux de transport optiques. Améliorer la flexibilité et assurer la transparence des réseaux optiques sont des défis très importants auxquels les opérateurs doivent faire face aujourd'hui. Un réseau optique est dit transparent, si les signaux optiques transportés ne subissent aucune conversion optoélectronique sauf au moment de leur insertion et de leur extraction dans le réseau optique. La flexibilité, quant à elle, concerne principalement les fonctions d'agrégation et de désagrégation optiques. Aujourd'hui ces fonctions d'agrégation et de désagrégation sont réalisées dans le domaine électronique, ce qui avec la montée du débit, va engendrer un coût important pour les opérateurs. Une manière d'y remédier serait de trouver une technologie adaptée à la montée du débit et offrant la possibilité de faire de l'agrégation et de la désagrégation optique des flux de trafics. Dans cette thèse nous proposons d'étudier une technique de commutation tout-optique offrant la possibilité de faire de la commutation optique intra-canal. Cette technique, baptisée multi-bande OFDM, consiste à diviser un canal WDM en plusieurs entités appelées sous-bandes. Le nombre de ces entités dépend des contraintes technologiques des équipements utilisés pour générer le canal multi-bande (les filtres optiques, les convertisseurs analogiques/numérique et numériques/analogiques). Nous comparons la technologie multi-bande OFDM par rapport à des technologies tendancielles mono-bande : le cas mono-bande opaque et mono-bande transparent. Nous démontrons que la technologie multi-bande OFDM peut être un compromis entre ces deux technologies pour les futurs réseaux de télécommunications optiques. Pour ce faire, nous calculons les performances en termes de blocage. Nous étudions l'impact de la conversion de longueurs d'onde sur les réseaux multi-bande OFDM ainsi que l'impact d'augmenter les nombres de sous-bandes sur les performances du réseau. Nous dégageons les limites technologiques de cette approche. Dans une autre partie de l'étude, nous montrons l'intérêt économique de la technologie multi-bande OFDM. Nous exposons le gain en coût des émetteurs/récepteurs

obtenu grâce au déploiement de la technologie multi-bande OFDM sur un réseau cœur et un réseau métropolitain.

Mots clés : Réseau de transport optique, montée en débit, réseau opaque, réseau transparent commutation optique, multi-bandes OFDM

Abstract

The evolution of new telecommunication services, which requires large bandwidth, challenges bit-rates transported by each optical channel of a WDM network. Bit-rates of optical channels have now reached 100 Gbit/s. This increase in bit-rate must be supported by new features in optical network. Improve flexibility and ensure transparency of optical network, are very important challenges that telecom operators face today. An optical network is called transparent, if the transported optical signals are not converted in electrical domain except at the time of their insertion and extraction in/from the optical network. Flexibility concerns mainly the aggregation/disaggregation processes. Today, the functions of aggregation/disaggregation are made on the electrical domain. This generates a significant cost for operators. One way to avoid this would be to find a technology which offers high bit-rates and enable the aggregation and disaggregation functions in the optical domain. In this thesis, we propose to study all-optical switching technology at the sub-wavelength granularity. This technique, called multi-band OFDM, consists in dividing a WDM channel into multiple entities, called sub-bands. The number of sub-bands depends on the technological constraints of optical components used to transport the optical signal (optical filters, digital analogical converters, analogical digital converters, optical transponders, optical multiplexers, etc.). We compare the multi-band OFDM technology to two legacies scenarios: mono-band opaque and mono-band transparent WDM technologies. We demonstrate that the multi-band OFDM technology can be a trade-off between these two legacies scenarios. To do that, we studied the performance in terms of blocking ratio of the multi-band OFDM technology and mono-bands WDM technologies. We study the impact of increasing the number of sub-bands on network performances. We also investigate the technical limits of this technology. Moreover, we demonstrate the economic interest of the multi-band OFDM. We expose the gain on the number of transponders when the multi-band OFDM technology is deployed on metro and core network.

Key words: optical transport network, high bit-rates, opaque network, transparent network, optical switching, sub-wavelength switching, multi-band OFDM

Contenu

Résumé……...2

Abstract……..4

Table des figures……10

Liste des tableaux……..13

Liste des abréviations……14

Chapitre I. Introduction 15

Chapitre II. Contexte de l'étude 19

II.1. Nomenclature 20

II.2. Les réseaux optiques 21

II.2.1. Architecture des réseaux optiques 21

II.2.2. Le système de transmission avec multiplexage en longueur d'onde 22

II.3. Réseaux WDM optiques..... 24

II.3.1. Réseaux optiques transparents 24

II.3.2. Réseaux optiques opaques 27

II.3.3. Synthèse sur le brassage opaque et le brassage transparent..... 29

II.4. Solutions pour répondre à l'augmentation du trafic : vers plus de flexibilité dans la couche optique 29

II.4.1. Optical Burst Switching..... 30

II.4.2. SLICE Spectrum-sliced Elastic Optical Path Network..... 30

II.5. Conclusion..... 32

Chapitre III. La technologie multi-bande OFDM optique 33

III.1. Concepts de la technologie multi-bande OFDM 35

III.2. Le filtrage optique 37

III.3. Brassage de sous-bandes optiques 38

III.4. Adaptation du débit et du nombre de sous bandes dans les réseaux multi-bandes OFDM 42

III.5. Comparaison de la technologie multi-bande OFDM avec la notion de bande de canaux WDM (waveband en Anglais) 43

III.6. Etude comparative préliminaire entre les technologies de réseaux multi-bande OFDM, mono-bande transparent et mono-bande opaque 47

III.6.1. Exemple de comparaison entre Multi-bande OFDM optique et mono-bande transparent sur une topologie de réseau élémentaire 48

III.6.2. Hypothèses pour l'étude préliminaire sur un seul nœud 51

III.6.3. Critères de comparaison 52

III.6.4. Analyse et discussion des résultats 54

III.7. Conclusion 60

Chapitre IV. Etude de performances de la technologie multi-bande OFDM 61

IV.1. Introduction 61

IV.2. Modèle de simulation 62

IV.3. Hypothèses de simulation 63

IV.3.1. Hypothèses générales 63

IV.3.2. Hypothèses sur le trafic inséré 66

IV.4. Fonctionnement du modèle de simulation pour les différentes architectures étudiées……. 67

IV.4.1. Routage des demandes 67

IV.4.2. Fonctionnement du simulateur dans le cas de l'architecture mono-bande transparent…. 68

IV.4.3. Fonctionnement du modèle de simulation pour le cas mono-bande opaque…… 70

IV.4.4. Fonctionnement du modèle de simulation pour le cas multi-bande OFDM optique……. 71

IV.5. Résultat de simulations 76

IV.5.1. Considération physique pour le choix du nombre de sous-bandes pour l'architecture multi-bande OFDM 77

IV.5.2. Multi-bande OFDM optique versus mono-bande opaque et mono-bande transparent…. 78

IV.5.3. Impact du déploiement des convertisseurs de longueur d'onde/sous-bandes dans les réseaux multi-bandes OFDM optiques..... 81

IV.5.4. Impact de la variation de nombre de sous-bandes 86

IV.5.5. Impact du changement de la topologie 88

IV.6. Contraintes technologiques liées au nombre de sous-bandes 91

IV.7. Dépasser la contrainte de filtrage optique 96

IV.8. Conclusion 100

Chapitre V. « Dimensionnement » des réseaux multi-bandes OFDM optiques 103

V.1. Introduction 103

V.2. Architecture des transpondeurs multi-bandes OFDM..... 104

V.3. Evaluation de la technologie multi-bande OFDM sur les réseaux métropolitains… 107

V.3.1. Calcul du nombre de transpondeurs dans les réseaux métropolitains..... 110

V.3.2. Coût des différents scénarios 112

V.4. Evaluation de la technologie multi-bande OFDM dans un réseau cœur..... 116

V.4.1. Algorithme de dimensionnement..... 117

V.4.2. Comparaison de la technologie multi-bande OFDM et la technologie mono-bande transparent sur le réseau cœur NSFNET 119

V.4.3. Résultats de dimensionnement..... 120

V.4.4. Calcul du coût du déploient de la technologie multi-bande OFDM sur le réseau NSFnet 122

V.4.5. Impact de la variation du nombre de sous-bandes sur le dimensionnement du réseau 126

V.5. Conclusion 127

Chapitre VI. Conclusion et perspectives 129

VI.1. Conclusion 130

VI.2. Perspectives 134

Table des figures

Figure II-1 Les différentes parties d'un réseau optique 21
Figure II-2 Système WDM 22
Figure II-3 Architecture générique d'un nœud du réseau transparent 24
Figure II-4 Exemple de la contrainte de la continuité de la longueur d'onde dans un réseau mono-bande transparent 25
Figure II-5 Démonstration d'un brassage transparent 26
Figure II-6 Architecture générique d'un nœud opaque 27
Figure II-7 Démonstration d'un brassage opaque 28
Figure III-1 Structure spectrale d'un canal WDM de type OFDM multi-bande 36
Figure III-2 Exemple d'extraction et d'insertion d'une sous bande dans le réseau multi-bande OFDM 38
Figure III-3 Commutation de sous-bandes à l'intérieur du nœud 2 39
Figure III-4 Agrégation/désagrégation de sous-bandes 40
Figure III-5 Commutateur Waveband optique à trois niveaux hiérarchiques 44
Figure III-6 Utilisation des transpondeurs dans le cas multi-bande OFDM 46
Figure III-7 Topologie et matrice du trafic du réseau à dimensionner 48
Figure III-8 Comportement des différents types de nœud 52
Figure III-9 Nombre de canaux WDM utilisés à la sortie d'un nœud en fonction d'un exemple de trafic add (a_i) 55
Figure III-10 nombre d'interface électrique en fonction de ration de transit dans le cas où une interface par sous-bande est considérée pour des demandes de débit de 100 Gbit/s 57
Figure III-11 nombre d'interface électrique en fonction de ratio de transit dans le cas où une interface par sous-bande est considérée pour des demandes de débit de 50 Gbit/s 57
Figure III-12 nombre d'interface électrique en fonction de ratio de transit dans le cas où une interface par canal multi-bande est considérée pour des demandes de débit de 100 Gbit/s 58
Figure III-13 nombre d'interface électrique en fonction de ratio de transit dans le cas où une interface par canal multi-bande est considérée pour des demandes de débit de 50 Gbit/s 59
Figure IV-1 Interconnexion des modules dans le simulateur Omnet++ 63
Figure IV-2 Réseau NSFnet 66
Figure IV-3 Représentation de l'état des ressources d'un lien d'un réseau mono-bande transparent 68
Figure IV-4 Algorithme utilisé pour l'admission des connexions dans le réseau mono-bande transparent demande 69
Figure IV-5 Représentation de l'état des ressources d'un lien d'un réseau mono-band opaque 70
Figure IV-6 Algorithme utilisé pour l'admission des connexions dans le réseau mono-bande opaque 71
Figure IV-7 Algorithme utilisé pour l'admission des connexions dans le réseau multi-bande OFDM 73
Figure IV-8 Phase de sélection des sous-bandes dans le cas multi-bande OFDM : cas d'une demande acceptée 74

Figure IV-9 Phase de sélection des sous-bandes dans le cas multi-bande OFDM : cas d'une demande bloquée 75
Figure IV-10 taux de blocage pour les scenarios mono-bande transparent, mono-bande opaque et mono-bande transparent en fonction de la charge offerte par le générateur pour le réseau NSFnet 79
Figure IV-11 Topologie et trafic d'un exemple de réseau à 4 nœuds 79
Figure IV-12 Sources de blocage dans les réseaux multi-bandes OFDM 81
Figure IV-13 Exemple de conversion de longueur d'onde dans un réseau optique composé de 3 nœuds ... 83
Figure IV-14 Exemple de conversion de sous-bandes dans les réseaux multi-bandes OFDM 84
Figure IV-15 Impact du déploiement des convertisseurs sur les performances des réseaux multi-bandes OFDM 85
Figure IV-16 Nombres de demandes à 3 sauts acceptées dans le cas multi-bande OFDM avec conversion et sans conversion et avec 4 sous-bandes 85
Figure IV-17 Nombres de demandes à 1 saut accepté dans le cas multi-bande OFDM avec conversion et sans conversion et avec 4 sous-bandes 86
Figure IV-18 Taux de blocage dans le réseau mono-bande opaque et le réseau multi-bandes OFDM à 10 sous-bandes et à 4 sous-bandes 88
Figure IV-19 Taux de blocage pour les scenarios mono-bande transparent, mono-bande opaque et mono-bande transparent en fonction de la charge offerte par le générateur pour le réseau représentatif d'Orange 89
Figure IV-20 Impact du déploiement des convertisseurs sur les performances des réseaux multi-bandes OFDM dans le de la topologie d'Orange 89
Figure IV-21 Taux de blocage dans le réseau mono-bande opaque et le réseau multi-bandes OFDM à 10 sous-bandes et à 4 sous-bandes dans le cas du réseau d'Orange 90
Figure IV-22 Schéma de principe du découpage d'un canal WDM en sous-bandes OFDM 91
Figure IV-23 Exemple de filtrage dans le cas de la configuration $C_{7\ \text{sous-bandes}}$ 93
Figure IV-24 Exemple de filtrage dans le cas de la configuration $C_{8\ \text{sous-bndes}}$ 94
Figure IV-25 Exemple de filtrage dans le cas de la configuration $C_{10\ \text{sous-bandes 75GHz}}$ 95
Figure IV-26 Performance en termes de blocage des configurations $C_{\text{référence}}$, $C_{7\ \text{sous-bandes}}$ et $C_{10\ \text{sous-bandes 75 GHz}}$ 96
Figure IV-27 Performance en termes de blocage des configurations $C_{\text{référence}}$, $C_{10\ \text{sous-bandes 75 GHz}}$, $C_{10\ \text{sous-bandes 50 GHz}}$ 98
Figure V-1 Différentes architectures possibles pour un transpondeur multi-bande OFDM pour un canal WDM composé de quatre sous-bandes 104
Figure V-2 Topologie du réseau métropolitain étudié 108
Figure V-3 Cas de nécessité d'agrégation dans la partie secondaire du réseau 109
Figure V-4 Influence du seuil d'agrégation sur le nombre de transpondeurs nécessaire dans le réseau métropolitain proposé et pour les différents scenarios de modulation 111

Figure V-5 Coût du réseau primaire pour les différentes architectures multi-bandes et l'architecture 10 Gbit/s WDM 113
Figure V-6 Taux de remplissage des sous-bandes en fonction des seuils d'agrégation dans les différents scenarios des réseaux multi-bandes OFDM..... 114
Figure V-7 Valeur maximale du facteur μ en fonction de chaque seuil d'agrégation pour le réseau primaire 116
Figure V-8 Fonctionnement de l'algorithme de dimensionnement 118
Figure V-9 Exemple de fonctionnement de l'algorithme de dimensionnement 119
Figure V-10 Exemple de calcul du nombre de transpondeurs en émission dans le cas multi-bande OFDM et le cas mono-bande transparent..... 121
Figure V-11 Exemple de calcul du nombre de transpondeurs en réception dans le cas multi-bande OFDM et le cas mono-bande transparent..... 122
Figure V-12 Evolution des coûts d'agrégations dans les réseaux multi-bandes OFDM en fonction du paramètre μ..... 125

Liste des tableaux

Tableau III-1 distribution du trafic 49
Tableau IV-1 caractéristique du réseau métropolitain 66
Tableau IV-2 Représentation de l'état des ressources d'un lien d'un réseau multi-bande OFDM 72
Tableau IV-3 Synthèse des paramètres utilisés pour les simulations 77
Tableau IV-4 Configuration de référence $C_{\text{référence}}$ 92
Tableau IV-5Configuration $C_{7\ \text{sous-bandes}}$ 92
Tableau IV-6 Configuration $C_{8\ \text{sous-bndes}}$ 93
Tableau IV-7 Configuration $C_{10\ \text{sous-bandes 75 GHz}}$ 94
Tableau IV-8 Récapitulatif des configurations $C_{\text{référence}}$, $C_{7\ \text{sous-bandes}}$ et $C_{10\ \text{sous-bandes 75 GHz.}}$ 95
Tableau IV-9 Configuration $C_{10\ \text{sous-bandes 50}}$ GHz 97
Tableau IV-10 récapitulatif des configurations $C_{\text{référence}}$, $C_{10\ \text{sous-bandes 75 GHz}}$, $C_{10\ \text{sous-bandes 50 GHz}}$ 98
Tableau V-1 caractéristique du réseau étudié 108
Tableau V-2 Trafic échangé entre les nœuds primaires et nœuds Edge 110
Tableau V-3 Modele de coûts pour les différents scenarios étudiés 113
Tableau V-4 Nombre de transpondeurs utilisés pour transporter le trafic 120
Tableau V-5 Valeur limite du paramètre μ 124
Tableau V-6 Impact de la variation du nombre de sous-bandes sur le dimensionnement des reseaux multi-bandes OFDM 126

Liste des abréviations

DSL	Digital Subscriber Line
DWDM	Dense Wavelength Division multiplexing
EDFA	(Erbium Doped Fiber Amplifier)
EXC	Electrical Cross Connect
FTTH	Fiber To The Home
FXC	Fiber Cross Layer
FFT	Fast Fourier Transform
IFFT	Inverse Fast Fourier Transform
ITU	International Telecommunication Union
IP	Internet Protocol
OBS	Optical Burst Switching
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
O-E-O	Optical to Electrical
OTN	Optical Transport Network
OXC	Optical Cross Connect
PDH	PlesiochronousDigital Hierarchy
PMD	Polarization Mode Dispersion
PoP	Point of Presence
QPSK	"Quadrature Phase-shift Keying
ROADM	Reconfigurable Optical Add Drop Multiplexer
SDH	Synchronous Digital Hierarchy
VOD	Video On Demand
WDM	Wavelength Division Multiplexing
WSS	Wavelength Selective Switch
WBXC	Waveband Cross Connect
WXC	Wavelength Cross connect

Chapitre I. **Introduction**

Cette thèse entre dans le cadre du projet FUI (projet du pôle de compétitivité Images et Réseaux) 100G FLEX. Ce projet est un travail collaboratif entre EKINOPS, l'Institut Telecom, MERCE (Mitsubishi-Electric Research & Development Center Europe), l'université de Rennes 1, Yenista Optics et Orange Labs.

L'objectif du projet 100G FLEX vise au développement de systèmes de transmission optique flexibles multiplexés en longueur d'onde (WDM) avec des débits de 100 Gbit/s. 100G FLEX a pour but de démontrer la pertinence du format de transmission optique multi-bandes OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing). Ce format de transmission pourrait autoriser à la fois une grande capacité en débit, une importante efficacité spectrale et le support de nouvelles fonctionnalités de networking optique en offrant la possibilité d'un accès tout optique à un niveau de granularité inférieur à la longueur d'onde. Dans cette optique, le projet 100G FLEX a pour objectifs de :

1) Définir un format de modulation multi-bande OFDM satisfaisant aux critères de performances spectrales et de flexibilité.
2) Intégrer une transmission multi-bande OFDM en temps réel incluant la réalisation d'un prototype industriel de transmission.
3) Réaliser une maquette de multiplexeur/démultiplexeur d'insertion/extraction optique d'une ou plusieurs sous-bandes.
4) Analyser l'intérêt économique de l'utilisation de la technologie multi-bandes OFDM sur des scénarios de réseaux métropolitains.

Le travail présenté dans ce mémoire concerne principalement le point 4 en utilisant les résultats fournit par le projet sur les points 1, 2 et 3. Une extension de la problématique du projet 100G FLEX aux réseaux cœurs est également proposée dans ce mémoire.

Depuis quelques années, le trafic dans les réseaux de transport optique observe une augmentation d'environ 45% par an [1]. Internet est aujourd'hui devenu indispensable pour chaque foyer. Resté connecté est devenu une nécessité pour les consommateurs que ce soit à travers les technologies filaires ou les technologies sans-fil (la grande croissance des Smartphones). Par conséquent le nombre de dispositifs connectés dans un foyer tend à

augmenter. Aujourd'hui il est de 3 en moyenne et en 2020 il devrait atteindre les 50 dispositifs (Tablettes, Smartphone, LiveBox, jeux vidéo...). L'utilisateur souhaite quotidiennement accéder aux différents services offerts par internet comme la VOD (Video On Demand) et le streaming TV. Ces nouveaux services sont de plus en plus gourmands en bande passante [2]. En juin 2010, Cisco a publié un document estimant l'évolution de la quantité du trafic IP qui sera véhiculé dans les réseaux de transport entre l'année 2009 et 2014 [3]. Selon ces estimations, le trafic internet en 2014 représentera 4,3 fois le volume du trafic de 2009. Les fournisseurs de services doivent donc répondre à cette demande croissante de bande passante. Afin de répondre à l'augmentation prévue du volume de trafic dans les réseaux optiques, de nouvelles solutions doivent être envisagées pour accroitre les capacités en débit dans les réseaux, en général, et dans les réseaux optiques métropolitains et cœurs, en particulier. Augmenter les débits et passer de 10 Gbit/s à 100 Gbit/s par canal WDM permet de répondre à cette augmentation des volumes de trafic. Néanmoins, un canal WDM à 100 Gbit/s n'est avantageux que s'il est bien rempli. Certes le volume total du trafic augmente, mais les affluents générés par les utilisateurs restent petits. Ceci nécessite le recours à des fonctions électriques pour agréger et désagréger les affluents à chaque passage dans un nœud du réseau. Dans ce contexte, nous étudions, dans cette thèse, une technologie qui offre certes une augmentation du débit par canal WDM mais également la flexibilité souhaitée dans les futurs réseaux de transport optique en permettant la réalisation d'opérations d'agrégation/désagrégation tout optique à l'intérieur d'un canal WDM sans avoir recourt à une conversion optique/électrique. Cette technologie, appelée multi-bande OFDM optique, consiste à diviser le canal WDM en différentes entités optiques indépendantes, nommées sous-bandes.

Le but de cette thèse consiste à mettre en évidence les avantages introduits par ce concept de réseau multi-bande OFDM en comparaison avec des architectures tendancielles plus classiques : l'architecture mono-bande opaque et mono-bande transparent. Notre comparaison se base sur l'évaluation des performances du réseau ainsi que du coût de la technologie multi-bande OFDM par rapport aux technologies mono-bande opaque et mono-bande transparent.

Ce mémoire est divisé en deux parties principales : la première partie introduit l'ensemble des notions nécessaires à l'étude alors que la deuxième regroupe les principaux résultats de simulations du déploiement de la technologie multi-bande OFDM dans les réseaux optiques.

La première partie est composée de deux chapitres. Le premier chapitre introduit les concepts des réseaux optiques et décrit le principe des réseaux opaques et des réseaux transparents qui serviront de référence pour évaluer les performances des réseaux utilisant une technologie multi-bande OFDM. Les techniques de commutation associées à chacun de ces types de réseaux seront également expliquées. Enfin nous exposons les avantages et inconvénients liés à ces scénarios.

Le deuxième chapitre présente le concept de la technologie multi-bande OFDM et les fonctions de commutation optiques des sous-bandes ainsi que les techniques utilisées pour réaliser ces fonctions. Nous comparons la technologie multi-bande OFDM à une technologie mono-bande similaire connue sous le nom de « Waveband » ou bande de longueurs d'onde. Afin de mieux cerner l'intérêt de la technologie multi-bande OFDM, nous détaillons dans ce chapitre une étude préliminaire sur un seul nœud du réseau. Cette étude est faite en fonction du trafic traité dans un nœud (trafic injecté par les couches supérieures, trafic en transit, trafic extrait par les couches supérieures). Cette étude compare la technologie multi-bande OFDM aux scénarios tendanciels mono-bande opaque et mono-bande transparent. Nous calculons pour chaque technologie et sur un seul nœud du réseau le nombre d'interfaces électriques utilisées ainsi que le nombre des canaux WDM utilisés.

La deuxième partie de ce document présente des études réseaux en termes de coût et de performances sur des topologies de réseaux de référence. Nous présentons les hypothèses réseaux considérées et le coût des systèmes pris en compte dans notre étude. Sur la base de ces hypothèses, nous commentons les résultats quantitatifs relatifs à la comparaison réseau multi-bande OFDM aux réseaux opaques et réseaux transparents.

Le chapitre IV propose un modèle de simulation permettant de calculer les performances des réseaux multi-bandes OFDM en termes de blocage par rapport aux solutions mono-bandes. Dans ce chapitre, nous présentons d'abord les hypothèses de simulation permettant d'avoir un simulateur équitable pour les trois différentes technologies étudiées. Nous présentons ensuite les hypothèses sur la distribution du trafic étudié, sur la topologie du réseau ainsi que sur les caractéristiques des liens de transmission. Sur la base de ces hypothèses nous exposons le fonctionnement du simulateur et nous commentons les différents résultats obtenus. La dernière partie de ce chapitre étudie la faisabilité technique du découpage en sous-bandes des canaux multi-bandes OFDM. Les contraintes de filtrage

optique, point essentiel de la commutation de sous-bandes, sont exposées à la fin de ce chapitre.

Dans le cinquième chapitre, nous effectuons des comparaisons économiques entre les réseaux mono-bandes transparents et les réseaux multi-bandes OFDM. Pour ce faire nous considérons deux architectures : une architecture de réseau métropolitain et une architecture de réseau cœur. Nous calculons pour chaque architecture le coût des équipements à déployer sur le réseau. Les hypothèses sur les coûts des systèmes utilisés dans le déploiement de la technologie multi-bande OFDM sont basées sur le coût des systèmes utilisés dans les réseaux mono-bandes. Ces scénarios prennent en compte l'évolution de la topologie et le trafic du réseau dans un futur proche. Nous évaluons, alors, à quelles conditions le réseau multi-bande OFDM pourra être une alternative économique intéressante vis-à-vis du réseau mono-bande transparent. Nous mettons en évidence un ensemble de facteurs ayant un impact déterminant sur les résultats de la comparaison entre l'approche mono-bande transparent et l'approche multi-bande OFDM ; à titre d'exemple, ces facteurs peuvent être : le coût des transpondeurs multi-bandes OFDM par rapport au coût des transpondeurs mono-bandes, le coût de commutation de sous-bande par rapport à la commutation des longueurs d'onde (ROADM).

Enfin le dernier chapitre est consacré aux conclusions et à la présentation des perspectives qui découlent de cette étude.

Chapitre II. **Contexte de l'étude**

Les réseaux optiques fournissent d'énormes capacités de transmission de données et offrent une infrastructure commune sur laquelle une variété de services peut être transmise. Dans un premier temps, la technologie optique a été essentiellement utilisée pour transmettre des données sur une grande distance et pour fournir une capacité plus importante que les câbles coaxiaux. Les réseaux optiques ont ensuite évolués et des fonctionnalités plus avancées ont été introduites au niveau de la couche optique, comme le multiplexage optique et la commutation optique [4] [5]. Dans ce chapitre nous nous intéressons à la description des réseaux mettant en œuvre ce type de technique. Nous examinons d'abord les notions de base comme l'architecture des réseaux optiques et la technique de multiplexage en longueur d'onde. Ensuite nous présentons les principales caractéristiques des différents types de réseaux optiques. Enfin, nous exposons certaines solutions qui pourraient répondre à l'augmentation du volume du trafic dans les réseaux optiques.

II.1. Nomenclature

Dans la littérature, nous trouvons différents termes utilisés dans le domaine des réseaux optiques avec parfois des significations différentes. Afin de clarifier certaines notions Nous définissons ici les termes que nous utiliserons tout au long du mémoire :

Canal WDM optique : longueur d'onde transportant un signal entre les deux extrémités d'une fibre optique.

Connexion : dans cette étude il s'agit d'une liaison logique établie entre deux nœuds quelconque du réseau à travers laquelle un signal optique est transporté.

Chemin : succession des liens et des nœuds empruntés par une connexion entre le nœud d'entrée (source) et le nœud d'arrivée (destination). Il peut aussi être appelé parcours physique.

Chemin optique (lightpath) : chemin établi entre les nœuds source et destination constitué par les nœuds et les liens traversés et les canaux WDM occupés dans chaque lien du chemin.

Demande (requête) : besoin d'une connexion entre deux nœuds (source et destination) appartenant au réseau. Chaque demande est formée par un triplet : source, destination et débit associé.

Granularité : correspond à la plus petite unité traitable par un nœud. Un trafic de granularité de 10 Gbit/s signifie que les canaux WDM optiques ne pourront pas avoir de débits plus faibles et que les débits plus élevés sont des multiples de cette unité.

Topologie du réseau : schématisation du réseau par des liens et des nœuds.

Trafic : ensemble de demandes à établir (matrice de trafic) ou établies (trafic présent dans le réseau). La matrice de trafic est la liste des demandes à écouler dans le réseau, chaque demande est formée par un triplet : source, destination et débit associé.

Fonction d'agrégation/désagrégation des demandes : la fonction d'agrégation est le fait de grouper plusieurs demandes dans un seul canal WDM optique. La désagrégation consiste à séparer les demandes qui ont été agrégées dans un canal WDM optique.

II.2. Les réseaux optiques

Nous exposons, dans cette section, les notions de base permettant de comprendre l'organisation des réseaux optiques. Dans un premier temps, nous décrivons l'architecture de ces réseaux. Par la suite nous parlons des principales technologies utilisées dans les réseaux optiques.

II.2.1. Architecture des réseaux optiques

Les réseaux de télécommunications optiques sont généralement composés de trois parties : le réseau d'accès, le réseau métropolitain et le réseau cœur. La Figure II-1 illustre une architecture typique d'un réseau de télécommunication optique.

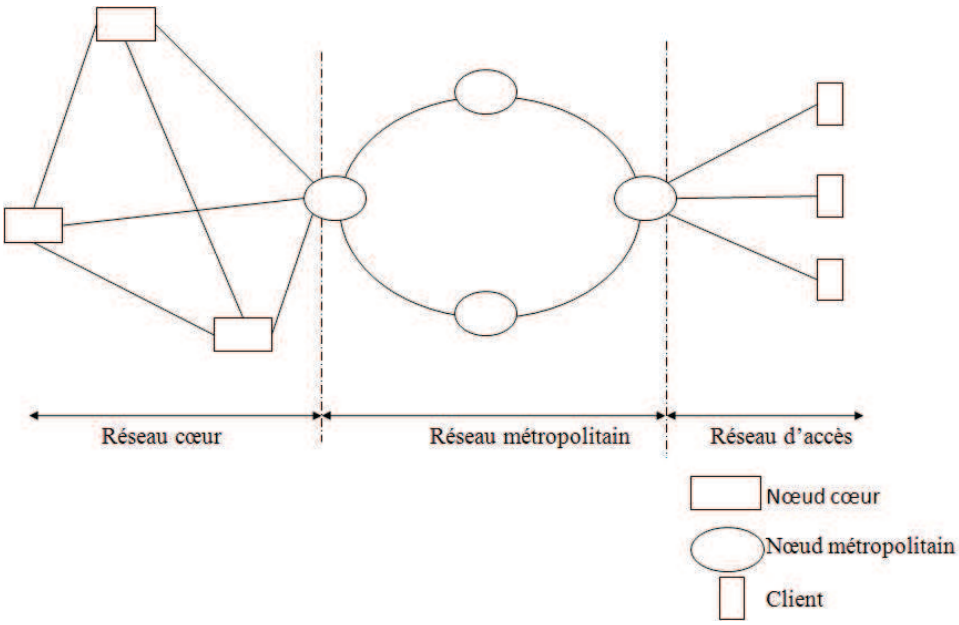


Figure II-1 Les différentes parties d'un réseau optique

Le réseau d'accès constitue le premier point de raccordement des clients au réseau de l'opérateur. Ce raccordement est généralement réalisé par une paire de cuivre, un câble coaxial ou une fibre optique selon les technologies mise en œuvre (XDSL pour le cuivre, FTTH (Fiber To The Home) pour la fibre optique). Il se caractérise par une portée (longueur entre le point de raccordement et l'abonné) limitée de quelques kilomètres à quelques dizaines

de kilomètres pour la FTTH [6]. Le réseau métropolitain sert à la collecte et à la distribution des flux de trafic des abonnés vers/depuis les points de raccordement au réseau cœur [7]. Le réseau métropolitain est caractérisé par des dimensions de quelques centaines de kilomètres. Il reçoit et distribue les flux de trafic (entrants et sortants) des abonnés par des nœuds qualifiés « frontières » ou « edge » en anglais. Le réseau cœur, quant à lui, interconnecte l'ensemble des réseaux métropolitains entre eux et à l'internet, aux plateformes de services (par exemple vidéo à la demande) et aux autres opérateurs. C'est la partie du réseau qui supporte la plus grosse quantité de trafic en utilisant les technologies les plus rapides en débit sur des distances importantes. Les réseaux métropolitains se rattachent à ce réseau. Les différents nœuds des réseaux métropolitains et des réseaux cœurs sont raccordés par des fibres optiques pouvant atteindre des capacités très importantes. Nous verrons, dans la section qui suit, les technologies de transmission utilisées dans le réseau cœur et le réseau métropolitain.

II.2.2. Le système de transmission avec multiplexage en longueur d'onde

Le transport des données sur les réseaux à fibre optique repose majoritairement sur le multiplexage en longueur d'onde (Wavelength Division Multiplexing : WDM). La Figure II-2 illustre la constitution d'un système WDM.

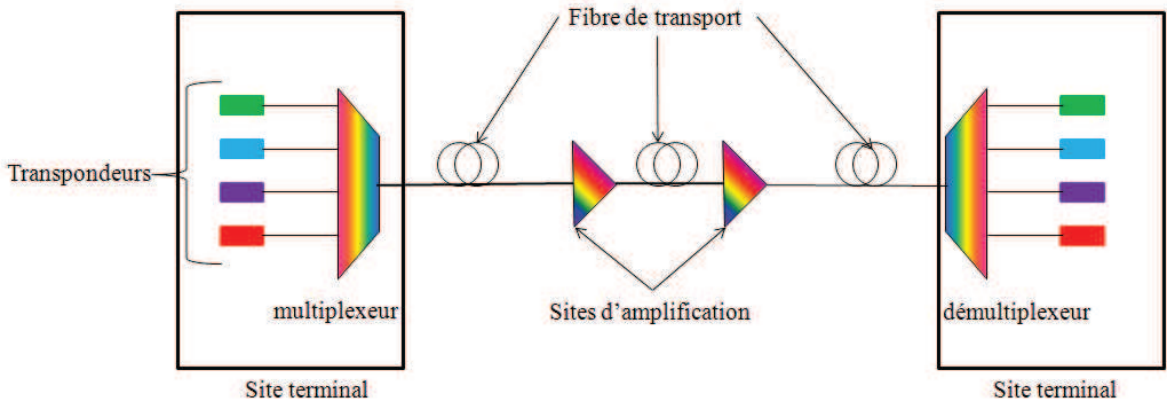


Figure II-2 Système WDM

La technologie WDM permet de transmettre les données simultanément sur des longueurs d'onde différentes se propageant sur une même fibre [8]. Chaque longueur d'onde correspond

à un canal de transmission et permet de transporter un débit de plusieurs gigabits par seconde. Un système de transmission WDM est généralement composé de sites terminaux et de sites d'amplification comme indiqué dans la Figure II-2.

- Un site d'amplification : Au cours de sa propagation dans la fibre optique le signal s'atténue. Les sites d'amplifications sur une ligne optique servent donc à compenser les pertes du signal. Généralement les amplificateurs sont installés tous les 40 à 120 km en moyenne en fonction de la topologie, de la géographie du réseau et de la longueur des systèmes installés. L'amplification EDFA (*Erbium Doped Fiber Amplifier*) est la plus courante. L'avantage de ce mode d'amplification est qu'il est tout optique (il n'y a pas de recours à des conversions optoélectroniques) et compatible avec WDM. C'est-à-dire qu'il amplifie toutes les longueurs d'onde sur une bande passante d'environ 30 nm (bande C) centrée autour de 1550 nm [9]. Le nombre maximal de longueurs d'onde utilisées par fibre dépend donc de leur espacement minimum, et de la largeur de cette bande d'amplification.
- Les transpondeurs : Les transpondeurs constituent l'interface d'émission et de réception du signal optique dans un système WDM. La fonction des transpondeurs est de transformer un signal client (SDH, PDH, Ethernet..), en un signal normalisé transporté sur une longueur d'onde WDM. Les transpondeurs constituent donc l'interface entre la couche cliente et la ligne optique. Pour ce faire, Ils réalisent des conversions optiques-électroniques puis électroniques-optiques. Ces équipements sont bidirectionnels, ils intègrent un émetteur dans un sens et un récepteur dans l'autre sens
- Les multiplexeurs/démultiplexeurs : Les multiplexeurs permettent de regrouper les différentes longueurs d'onde provenant de différents transpondeurs sur une seule fibre. La fonction du démultiplexeur fait le travail inverse; il permet de séparer les différents signaux WDM propagés dans une seule fibre. Comme illustré dans la Figure II-2, chaque transpondeur émet un signal sur une longueur d'onde différente λ_i, où $1<i<N$, N étant le nombre maximal de longueur d'onde. Un multiplexeur regroupe donc les longueurs d'onde et les transmet sur la fibre de transmission. Dans la partie réception, un démultiplexeur sépare les différentes longueurs d'onde et les envoie sur un transpondeur de destination.

II.3. Réseaux WDM optiques

Les réseaux optiques, qu'ils soient métropolitains ou cœurs, peuvent être principalement divisés en deux types: les réseaux optiques opaques et les réseaux optiques transparents. Dans cette section nous définissons chaque type de réseau.

II.3.1. Réseaux optiques transparents

Le terme transparence peut être lié à plusieurs critères. En général, il concerne le débit binaire, le format de modulation ou bien le format de transmission (SDH, PDH…). Ces points définissant la transparence sont évoqués dans [10]. Dans la suite de ce mémoire, la transparence désigne l'absence de conversion optoélectronique dans le réseau. Dans un réseau transparent, le signal optique n'est pas systématiquement converti en un signal électrique dans chaque nœud. La Figure II-3 illustre une architecture générique d'un nœud photonique du réseau transparent.

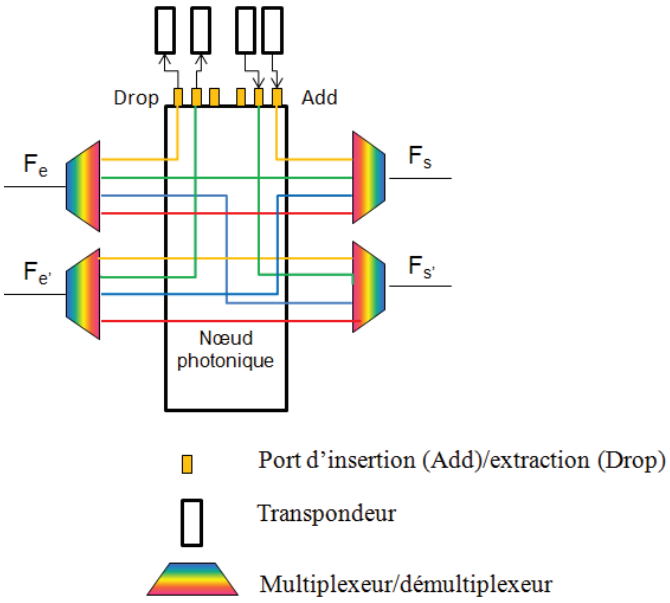


Figure II-3 Architecture générique d'un nœud du réseau transparent

Nous remarquons que les conversions optoélectroniques sont uniquement utilisées pour recevoir et transmettre du trafic à travers les ports d'extraction et d'insertion (port add/drop en

jaune). A l'entrée du nœud, le signal transporté par la fibre d'entrée F_e est dé-multiplexé. Les différentes longueurs d'onde sont par la suite routées vers les différents ports concernés. Certaines seront extraites dans le nœud à travers les ports de sortie (cas des longueurs d'onde jaune et verte) et d'autres (longueurs d'onde rouge et longueur d'onde bleue) seront dirigées vers les fibres de sortie F_s et passent en transit à travers le nœud. C'est la définition du brassage transparent. Les réseaux optiques basés sur les nœuds transparents sont largement déployés aujourd'hui [11]. Les nœuds photoniques sont maintenant utilisés dans les réseaux métropolitains et les réseaux cœurs.

Bien que les nœuds transparents permettent de s'affranchir de convertisseurs optoélectroniques pour les longueurs d'onde en transit et réduire ainsi le coût du réseau [12], ils présentent néanmoins, certains inconvénients. En effet, l'absence de conversions optoélectroniques dans le réseau, engendre des limitations sur l'utilisation de canal WDM. Dans un réseau optique transparent, un canal WDM utilisé pour véhiculer un trafic donné ne peut être changé en aucun point. Pour une demande d'un nœud source vers un nœud destination, le canal WDM doit donc être continu de bout en bout. Considérons l'exemple de la Figure II-4. Dans cet exemple, il y a 2 demandes de trafic en cours. Une demande du nœud 1 vers le nœud 2 utilisant le canal WDM transporté par la longueur d'onde λ_1 et une demande du nœud 2 vers le nœud 3 utilisant le canal WDM transporté par la longueur d'onde λ_2. Nous supposons dans cet exemple que le nombre maximum de longueurs d'onde sur chacun des liens 1-2 et 2-3 est égal à 2. Ces longueurs d'onde sont λ_1 et λ_2.

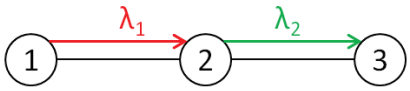


Figure II-4 Exemple de la contrainte de la continuité de la longueur d'onde dans un réseau mono-bande transparent

Dans ce cas de figure, si une nouvelle demande du nœud 1 vers le nœud 3 doit être établie, elle sera bloquée bien que sur chacun des liens 1-2 et 2-3 il existe un canal WDM disponible. Ce blocage est dû à la contrainte de continuité de la longueur d'onde : il n'existe pas une longueur d'onde disponible continue de 1 vers 3. Afin d'éviter ce blocage, on peut envisager d'installer dans le nœud 2 des convertisseurs de longueur d'onde afin de satisfaire la demande

1-3. Dans ce cas, la demande 1-3 utilisera sur le tronçon 1-2 la longueur d'onde λ_2 et sur le tronçon 2-3 la longueur d'onde λ_2. Un autre inconvénient des réseaux transparents est que chaque demande utilise toute la capacité du canal WDM indépendamment de son besoin réel. Considérons l'exemple de la Figure II-5.

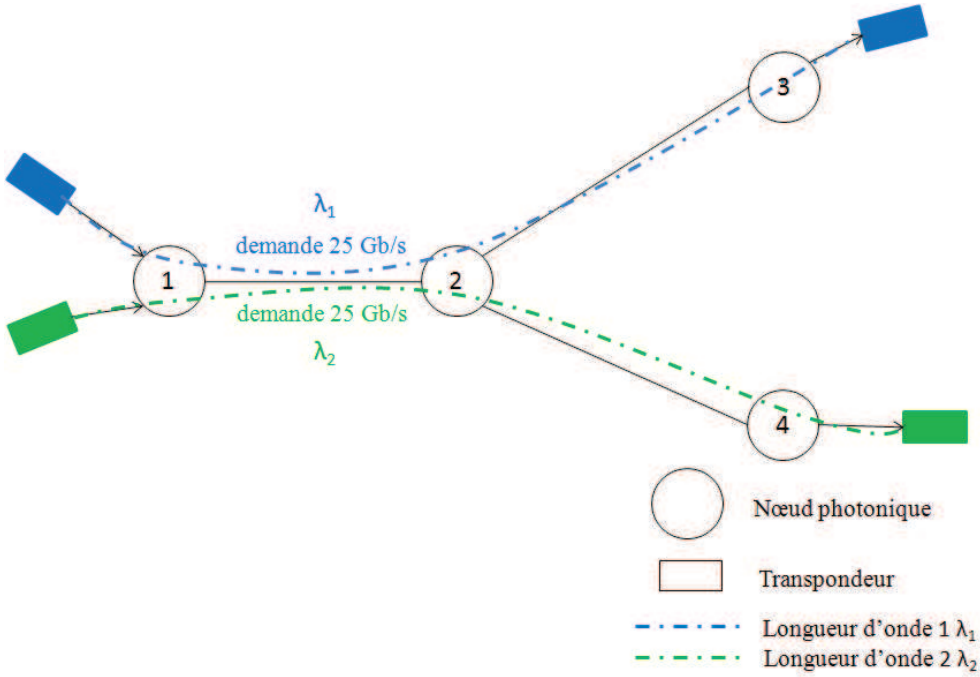


Figure II-5 Démonstration d'un brassage transparent

Nous supposons que nous avons 2 demandes de 25 Gbit/s à transporter dans le réseau : une demande du nœud 1 vers le nœud 3 et une demande du nœud 1 vers le nœud 4. Nous supposons aussi que les canaux WDM ont un débit de 100 Gbit/s. La demande provenant du nœud 1 et allant vers le nœud 3 utilise le canal WDM transporté par la longueur d'onde 1 (longueur d'onde bleue). La demande provenant du nœud 1 et allant vers le nœud 4 utilise le canal WDM transporté par la longueur d'onde 2 (longueur d'onde verte). Pour chaque demande, 2 transpondeurs sont utilisés. Les 2 demandes passent en transit par le nœud 2. Vu qu'on est dans le cas d'un réseau optique transparent, les 2 demandes sont routées dans le nœud 2 vers les différentes destinations sans aucunes conversions optoélectroniques. Nous remarquons ici que chacune des deux demandes utilise 25% de la capacité du canal WDM ce qui engendre une mauvaise utilisation des ressources réseaux. Il pourrait être plus efficace de

transporter les deux demandes sur une même longueur d'onde sur le tronçon 1-2 et de les désagréger optiquement dans le nœud de transit 2. Dans ce cas, un seul transpondeur serait utilisé pour émettre les deux demandes et une seule longueur d'onde serait utilisée sur le tronçon 1-2. Nous pourrions ainsi mieux utiliser la capacité fournit par le réseau et réduire le nombre de transpondeurs à installer au niveau des nœuds.

II.3.2. Réseaux optiques opaques

Au contraire du réseau transparent, un réseau opaque est un réseau où les conversions optoélectroniques sont déployées dans chaque nœud du réseau et sont utilisées pour chaque canal WDM. Le signal optique est systématiquement convertit en électrique lors de chaque passage dans un nœud. Dans ce type de réseau, la couche optique sert uniquement pour transporter un signal optique entre deux nœuds du réseau. La Figure II-6 représente une architecture générique d'un nœud opaque

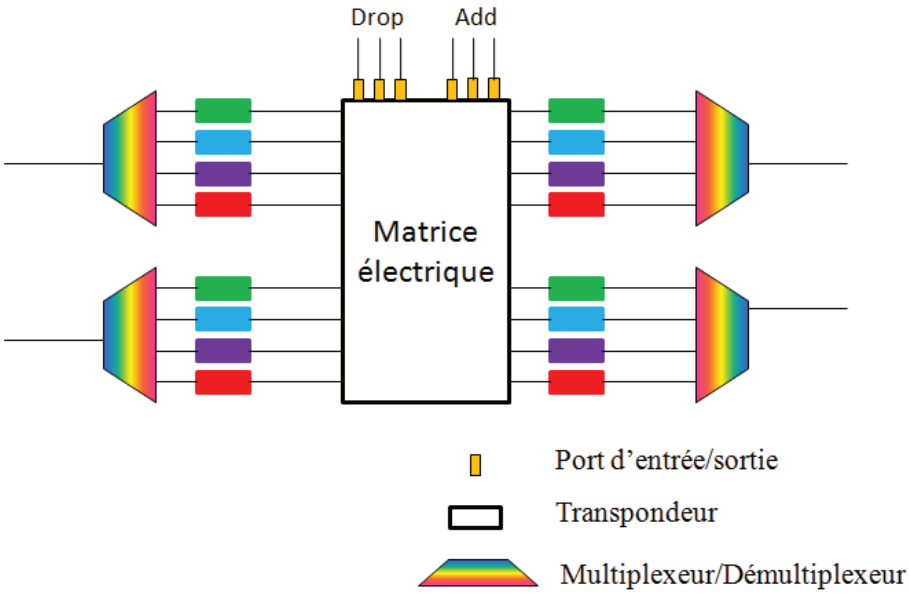


Figure II-6 Architecture générique d'un nœud opaque

Le signal entrant dans le nœud est dé-multiplexé puis convertit en électrique grâce à des transpondeurs. Si le nœud en question est le nœud destination, le signal est extrait du réseau par les ports de sorties (port drop). Sinon, le signal est reconverti en optique et transmis vers le prochain nœud [13]. Les ports « add » servent à injecter du trafic dans le réseau. Au cours de cette étude, nous n'avons considéré comme nœud opaque que le nœud à cœur électronique

permettant la commutation et les opérations d'agrégation. Le fait de convertir systématiquement le signal en électronique offre un degré de flexibilité important pour l'opération d'agrégation/désagrégation des demandes dans chaque nœud du réseau. Considérons l'exemple de la Figure II-7. Dans cet exemple nous proposons de démontrer l'avantage et l'inconvénient de la technologie mono-bande opaque.

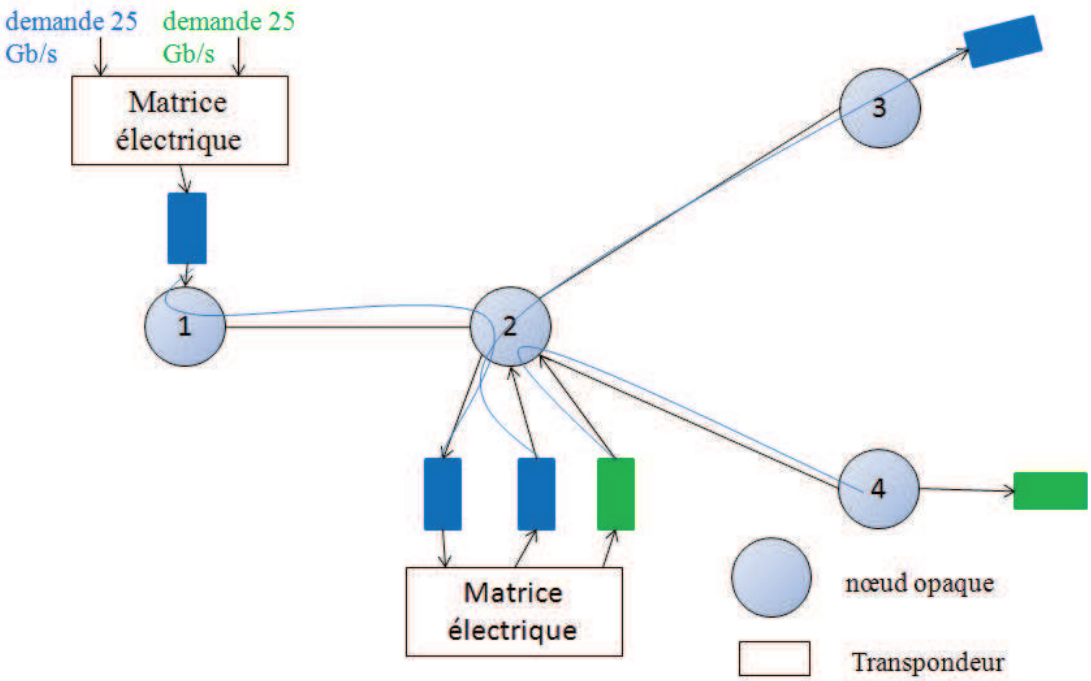


Figure II-7 Démonstration d'un brassage opaque

Le nœud 1 a 2 demandes à transmettre dans le réseau : une demande vers le nœud 3 et une demande vers le nœud 4. Ces 2 demandes se partagent le premier tronçon du chemin (le tronçon 1-2). Au niveau du nœud 1, ces deux demandes sont agrégées en électrique et émis dans le réseau par un même transpondeur. Dans le nœud 2 le signal est convertit en électrique et les demandes sont transmises indépendamment l'une de l'autre vers la destination associée. Nous remarquons que grâce à la fonction d'agrégation électrique, nous avons utilisé une seule longueur d'onde sur le tronçon 1-2. Par contre nous avons utilisé dans le nœud 2 des conversions optoélectroniques pour traiter le trafic. Le brassage opaque offre une flexibilité importante pour agréger et désagréger le trafic mais cela peut avoir un impact direct sur le coût du réseau vu que les conversions optoélectroniques sont déployées partout sur le réseau.

II.3.3. Synthèse sur le brassage opaque et le brassage transparent

Dans les sections II.3.1et II.3.2nous avons introduit les réseaux opaques et les réseaux transparents. Nous avons détaillé la technique de brassage dans chacun des réseaux. Nous avons montré les avantages et les inconvénients de chaque technique. Par exemple, la référence [14] montre que l'utilisation du transit tout optique comparé au transit électronique dans les réseaux cœur, permet d'économiser jusqu'à 50 % en consommation énergétique. Plus de détail sur le pour et le contre associés aux réseaux opaques et transparents sont exposés dans [15] [16]. Une solution permettant un compromis entre les deux techniques de brassage pourrait être bénéfique pour les opérateurs de télécommunications. En émission, l'idéal serait de pouvoir envoyer des trafics allant dans une même direction par un seul transpondeur et de pouvoir les séparer (désagréger) quand c'est nécessaire tout en restant dans le domaine optique. En réception l'idéal serait de pouvoir grouper (agréger) les demandes allant vers la même destination sur une même longueur d'onde afin de les réceptionner par un seul transpondeur à la destination. Pour répondre à ce cahier des charges, nous aurons donc besoin de plus de flexibilité au niveau de la couche optique ainsi que des fonctions de brassage optique à des granularités plus fines que celle de la granularité de la longueur d'onde.

II.4. Solutions pour répondre à l'augmentation du trafic : vers plus de flexibilité dans la couche optique

Suite à l'augmentation continue du trafic dans les réseaux de transport optiques, le débit par longueur d'onde et leur nombre par fibre s'est considérablement accrus. Les systèmes WDM actuels sont capables de transmettre une centaine de longueur d'onde dont le débit est passé à 40 Gbit/s et même 100 Gbit/s depuis peu [17]. Cette augmentation importante du débit nécessite l'intégration de plus de flexibilité pour le transport du trafic. Des fonctionnalités d'agrégation et désagrégation optique du trafic sont devenue nécessaires pour réduire le coût des réseaux de transports. Nous avons vu dans la section II.3.2 que le brassage opaque offre

une grande flexibilité pour traiter le trafic en offrant la possibilité d'agréger différents flux allant vers une même direction. Néanmoins, ce brassage opaque peut être gourmand en coût et en consommation énergétique ce qui n'est pas de l'intérêt des opérateurs télécoms. Ces flexibilités doivent donc être préférentiellement introduites au niveau de la couche optique afin de limiter l'utilisation des convertisseurs optoélectroniques et par conséquent réduire le coût du réseau pour l'opérateur. Ces flexibilités permettront principalement :

- D'accéder à des granularités plus fines que la longueur d'onde dans la couche optique afin de pouvoir agréger/désagréger le trafic tout en restant dans le domaine optique.
- D'adapter les ressources du réseau au besoin du trafic (adaptabilité du débit, de la bande passante…).

Plusieurs approches de réseaux optiques flexibles ont vu le jour. Nous pouvons citer, par exemple, Optical Burst Switching (OBS) [18], la technologie SLICE [19] [20]« Spectrum-sliced Elastic Optical Path Network » ainsi que les réseaux élastiques.

II.4.1. Optical Burst Switching

Plusieurs études ont été réalisées afin d'introduite le concept de transport de paquets dans les réseaux optiques. Le concept de commutation optique par rafales optiques ou "Optical Burst Switching" (OBS) a été introduit en 1999 par C.M. Qiao et J.S. Yoo [21] pour compenser le manque de flexibilité des réseaux optiques à commutation de circuits. L'approche OBS repose sur le principe de commutation de paquets optiques. Elle assure le partage de la longueur d'onde dans le domaine temporel au niveau de la couche optique. En effet, elle permet l'agrégation de plusieurs blocs, appelés Burst, appartenant à différents flux de données dans une même longueur d'onde. Néanmoins, quelques études, comme celle de [22], ont remis en cause les solutions OBS, par rapport à la commutation de circuit optique. Elles considèrent en effet que les solutions OBS proposées jusqu'à maintenant n'ont pas réussi à dépasser les contraintes technologiques (absence de mémoire optique, possibilité de collision entre burst…).

II.4.2. SLICE Spectrum-sliced Elastic Optical Path Network

Sous un autre angle, des améliorations ont été proposées aux réseaux optiques à commutation de longueur d'onde (réseau transparent et brassage transparent). Des

technologies offrant plus de flexibilité pour ce type de réseau ont été étudiées. En effet les réseaux transparents tendanciels décrits dans la section I.3.1, présentent des inconvénients par rapport à la bande passante en raison de sa rigidité et par rapport à la granularité quand seulement une partie de la capacité de la longueur d'onde utilisé. En aucun cas, la bande passante de la longueur d'onde peut être changée. Dans ce contexte l'architecture SLICE [23] « Spectrum-sliced Elastic Optical Path Network » introduit la notion de la flexibilité de la bande passante en fonction du débit des différentes demandes. Le but de SLICE est de fournir une manière spectrale efficace afin de transporter des débits de 100 Gbit/s et plus. Il s'agit d'allouer la bande passante appropriée pour transporter une demande donnée de bout en bout. La bande passante des canaux optiques est donc ajustée en fonction du volume du trafic. Pour ce faire, des transpondeurs à bande passante variable sont installés à la périphérie du réseau pour émettre et recevoir le trafic et des commutateurs optiques à bande passante variable sont installés dans le cœur du réseau afin de router les différentes demandes [20]. Les transpondeurs à bandes passante variable génèrent un signal optique utilisant le minimum de ressource spectrale permettant de transmettre un signal client de bout en bout. En même temps les différents commutateurs optiques installés pour router les demandes dans les nœuds intermédiaires allouent la bande passante nécessaire pour un chemin optique. L'architecture SLICE présente de nouveaux challenges. Elle introduit un nouveau concept d'élasticité qui offre plus de flexibilité à la couche optique notamment au niveau de l'allocation de la bande passante. La faisabilité de la technologie SLICE a été démontrée dans [24]. Néanmoins, cette technologie ne s'intéresse pas à la problématique de commutation citée dans la section II.3.3. A savoir que L'architecture SLICE n'intègre pas de mécanisme permettant de traiter des entités à l'intérieur de la longueur d'onde. C'est la capacité de la longueur d'onde qui varie pour avoir des granularités plus fines ou plus importantes.

II.5. Conclusion

Nous avons présentés dans ce chapitre les différentes notions en relation avec les études qui seront présentées dans les chapitres suivants. Nous avons exposés la composition des réseaux de télécommunication optique ainsi que les différents éléments et équipements d'un réseau de transport optique. Nous nous sommes par la suite intéressés aux différentes techniques de brassage utilisées dans les réseaux optiques actuels à savoir le brassage transparent et le brassage opaque. Nous avons cité les avantages et inconvénients de chacune des deux techniques en mettant en valeur les flexibilités recherchées par les opérateurs aujourd'hui. Finalement, nous avons parlé de certaines technologies de transmission optique flexible. Ces technologies ne répondent pas complètement aux flexibilités demandées par les opérateurs. En effet, elles n'offrent pas l'accès à des granularités plus fines que la longueur d'onde sans le recours à des conversions optoélectroniques. Par contre il existe une technologie qui offre cette flexibilité : OFDM multi-bande optique. Cette technologie offre la possibilité d'accéder à des granularités plus fines que la granularité de la longueur tout en restant dans le domaine optique. La technologie multi-bandes OFDM optique est un candidat intéressant pour répondre à l'augmentation du trafic tout en offrant plus de flexibilité à la couche optique. Dans le chapitre suivant nous présentons cette approche ainsi que les avantages qu'elle représente en termes de flexibilité.

Chapitre III. **La technologie multi-bande OFDM optique**

Dans le chapitre précédent, nous avons présenté les éléments nécessaires permettant de comprendre les réseaux optiques. Nous avons décrit 2 types de réseaux optiques, à savoir : les réseaux mono-bandes transparents et les réseaux mono-bandes opaques. Nous avons montré les avantages et les inconvénients de chacun de ces 2 réseaux. Les réseaux optiques transparents permettent de transporter les différentes demandes d'une manière transparente à travers les réseaux ce qui permet de réduire le nombre de conversions optoélectroniques. En contrepartie, dans ce type de réseaux les ressources optiques sont généralement sous-utilisées. Dans le cas des réseaux mono-bande transparents, quel que soit le débit d'une demande, elle utilise un canal WDM optique entier. Les réseaux mono-bandes opaques, quant à eux, permettent d'agréger plusieurs demandes dans un canal WDM optique à chaque nœud du réseau. En revanche cette agrégation se fait dans le domaine électrique. La croissance du trafic impose l'augmentation du débit transporté par les liens optiques dans les réseaux (augmentant ainsi la capacité des fibres), donc de passer à des débits de 100 Gbit/s et plus par canal WDM optique [25]. Cette augmentation du débit par canal WDM rend de plus en plus difficile leur remplissage efficace. Par conséquents, le besoin de faire de la conversion optoélectronique pour agréger le trafic augmente. Ceci réduit la transparence dans le réseau et augmente le coût. Notre motivation est donc de trouver une solution permettant de mieux remplir les canaux WDM sans recourir à la conversion optoélectronique. Une solution est de combiner agrégation et forte capacité en une seule technologie optique. On aurait ainsi une technologie de brassage offrant une partie de la flexibilité de la couche électrique (cas du brassage opaque) tout en conservant un maximum de transparence de la couche optique (cas du brassage transparent). Dans ce contexte, la technologie multi-bande OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) pourrait être une candidate intéressante. Dans ce chapitre, nous définissons d'abord le principe de la technologie multi-bande OFDM optique. Par la

suite, nous exposons la notion de brassage (commutation) de sous-bandes. Dans une troisième partie nous présentons les différents types de flexibilité offerte par cette technologie. Nous en dégageons ensuite les principales différences entre l'approche multi-bande OFDM et l'approche Waveband (ou bande de longueur d'onde). Finalement, une étude préliminaire sera faite permettant de comparer une approche multi-bande OFDM par rapport aux solutions tendancielles exposées dans le chapitre II.

III.1. Concepts de la technologie multi-bande OFDM

La montée en débit des systèmes de transmission optique WDM sur de longues distances à 100 Gbit/s par canal WDM et au-delà, augmente d'autant plus le besoin de désagréger ou d'agréger les affluents qui ont un débit plus petit. On a besoin de fonctions efficaces permettant de bien remplir les 100 Gbits du canal WDM. Aujourd'hui, ces fonctions d'agrégation sont réalisées en électronique grâce à l'Ethernet Switching, les routeurs IP où bien les brasseurs SDH/OTN [26]. Le fait d'augmenter le besoin en traitement électronique augmente potentiellement le coût et la consommation et réduit les opportunités offertes par la transparence permettant justement d'avoir des gains en coût et en consommation. La flexibilité offerte par les technologies d'agrégation optiques (en particulier celle que nous allons détailler) est intéressante pour réduire le coût et la consommation tout en permettant de faire de l'agrégation d'affluents de débits faibles. D'un autre côté, les formats de modulation qu'il est prévu d'utiliser dans un premier temps pour supporter la montée en débit à 100 Gbit/s sont basés sur une technique de modulation mono-porteuse (par exemple QPSK "Quadrature Phase-shift Keying") pas du tout adaptée à la commutation optique intra-canal WDM [27]. A l'opposé, l'OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) est une technique de modulation multi-porteuse. Elle peut être mise en œuvre en utilisant une ou plusieurs sous-bandes OFDM constituant le canal WDM. Par conséquent, elle est adaptée à la commutation optique intra-canal car les sous-bandes constituant le canal WDM sont indépendantes entre elles. En effet elles peuvent être émises et détectées indépendamment les unes des autres et occupent des positions spectrales différentes. Ainsi, Dans son approche multi-bande, l'OFDM est un candidat très intéressant pour désagréger ou agréger facilement les différents trafics portés par les sous-bandes. La technique de modulation OFDM a été d'abord utilisée et développée dans le domaine de la radio [28]. En effet, l'OFDM, contrairement au système mono porteuse, remplit les conditions de résistance aux trajets multiples (effet d'échos). Dans les années 2000, la technique OFDM a été introduite dans les communications optiques. Dans un premier temps, la technique OFDM a été appliquée à la radio sur fibre pour des débits de 1 à 10 Gbit/s [29] [30]. Ensuite, l'OFDM a été utilisée dans les systèmes de communication optiques [31] afin de répondre à l'augmentation continue du débit dans les réseaux optiques et contourner certains phénomènes de dégradation liés à la propagation des signaux optiques

[32]. En effet, le multiplexage OFDM assure intrinsèquement une robustesse face aux effets de dispersion, qu'il soit chromatique ou modale de polarisation (PMD - Polarization Mode Dispersion en anglais).

La technologie multi-bande OFDM optique peut être décrite de la manière suivante : Dans un canal WDM, on place *n* sous-bandes chacune composée de *m* sous-porteuses. Ce sont ces sous-bandes indépendantes qui son brassées optiquement.

La Figure III-1 illustre la répartition fréquentielle d'un canal multi-bande OFDM. Chaque sous-bande transporte un débit de l'ordre de *D/n* Gbit/s, *D* étant le débit que peut transporter un canal WDM. La valeur de *n* dépend des contraintes technologiques associées à la technologie multi-bande OFDM. Les convertisseurs Numériques/Analogiques/Numériques (CAN, CNA) utilisés pour calculer les fonctions de FFT (Fast **Fourier** Transfor) et IFFT (Inverse Fast **Fourier** Transform) [33] nécessaires à la réalisation du format OFDM ont une bande passante actuellement limitée à 7 GHz [34]. Si nous utilisons une grille standard de 50 GHz pour l'espacement des canaux (cas de la Figure III-1) et en prenant en compte 5 GHz de bande de garde de part et d'autre du canal, alors la bande utilisable sera de 40 GHz. Dans cette bande, 4 sous bandes peuvent être placées elles-mêmes espacée de 8 GHz avec une bande de garde pour le sous bandes de 2 GHz. Nous étudierons dans le Chapitre IV. l'impact du nombre de sous-bandes au sein d'un canal WDM sur les performances du réseau. **Dans la suite de document, on notera $b_{i,j}$ la sous-bande *i* du canal WDM multi-bande OFDM *j* (ou canal WDM j), avec $1 \leq i \leq n$ et $1 \leq j \leq N$ *N* étant le nombre de canaux WDM par fibre et *n* le nombre de sous-bande par canal WDM .**

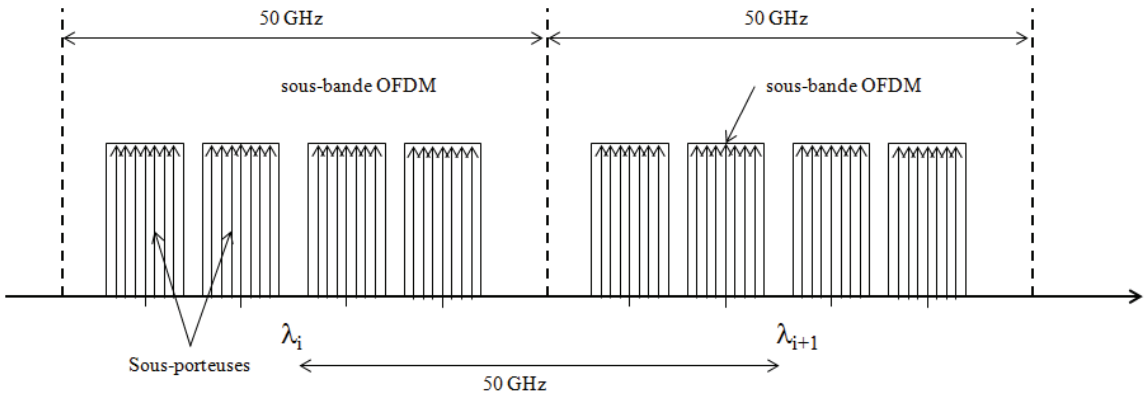


Figure III-1 Structure spectrale d'un canal WDM de type OFDM multi-bande

Le spectre des sous-bandes du canal optique est caractérisé par sa forme relativement rectangulaire avec des fronts très raides. Ceci est dû à l'utilisation d'une fréquence de modulation par sous-porteuse beaucoup plus basse que dans le cas mono-porteuse. En effet, dans le cas OFDM, le débit porté par la sous-bande est distribué sur chacune des sous-porteuses. La fréquence de modulation par sous-porteuse est donc beaucoup plus faible, ce qui conduit à un élargissement du spectre également beaucoup plus faible. Ce profil spectral particulier facilite l'insertion et/ou extraction des sous-bandes au sein du canal WDM par filtrage optique. Pour la suite de l'étude, nous retiendrons seulement qu'un canal WDM multi-bande OFDM est constitué de plusieurs sous-bandes.

III.2. Le filtrage optique

Actuellement, les fonctions de filtrage les plus couramment utilisées sont calées sur une grille standardisée par l'Union Internationale des Telecom secteur Télécommunications (ITU-T) avec des espacements entre canaux de 50 GHz (grille DWDM de l'ITU-T, norme G.694.1). Pour l'approche multi-bande OFDM optique, la sélectivité requise est bien plus réduite puisque les filtres doivent être capables de sélectionner des sous-bandes aussi fines que 10 GHz, voire quelques GHz selon la largeur spectrale des sous-bandes OFDM. De plus, ces filtres doivent avoir une réponse spectrale en phase et amplitude la plus constante possible avec des pertes réduites sur la partie « passante » du filtre et des fronts descendant extrêmement raides avec une forte isolation en dehors pour éviter de dégrader les sous-bandes voisines. Par abus de langage mais dans un souci de simplicité, on dit de ces filtres qu'ils doivent avoir une réponse en fréquence quasi-rectangulaire ou "square flat-top" en anglais. Les performances des filtres optiques accordables disponibles actuellement permettent d'atteindre des largeurs de bande de 6 à 30 GHz avec des fronts de 800 dB/nm [35]. A noter que pour réduire encore l'impact du filtrage ou limiter les contraintes requises sur la spécification de ces filtres, il est possible également de réduire ou d'annuler la modulation des sous porteuses les plus proches des bords des sous-bandes. Du point de vue de la transmission, le passage à travers des filtres successifs (par exemple à chaque passage de nœud du réseau), dégrade les performances et donc la portée des signaux. Cette dégradation s'accumule avec le nombre de filtres traversés [36]. Cependant une conception soignée

permet de réduire cet impact pour un nombre raisonnable de filtrages successifs. C'est pour cela que dans la suite de l'étude nous supposons un filtrage théorique parfait sans pénalité. Ces filtres peuvent être accordables et permettent d'extraire (drop) une ou plusieurs sous-bandes. La bande-passante de ces filtres peut varier de la largeur d'une sous-bande à la largeur du canal WDM complet. La Figure III-2 illustre un exemple d'insertion et d'extraction de sous-bandes. Le signal entrant dans le ROADM de sous-bande est d'abord dupliqué. L'une des copies, passe par un filtre passe bande afin d'extraire la sous bande en question. Dans notre exemple c'est la sous-bande rouge. L'autre copie du signal passe par un filtre stop-bande pour faire transiter les sous-bandes en transit par le nœud. Les sous-bandes en pointillées représentent des sous-bandes vides. Les sous-bandes en transit peuvent par la suite être agrégées avec des sous-bandes injectées dans le nœud, cas de la sous-bande verte. Ainsi, ces filtres permettent de réaliser les fonctions d'extraction ou de blocage nécessaire à la commutation de sous-bandes et offrent ainsi la fonction d'agrégation/désagrégation tout optique recherchée. Dans le cadre de l'étude une proposition filtre stop-bande a été brevetée [37]. Associés à un équipement de commutation optique, ils permettent de réaliser un commutateur de sous-bandes capable de traiter non-seulement les canaux WDM mais aussi de brasser les sous-bandes de ces canaux indépendamment les unes des autres.

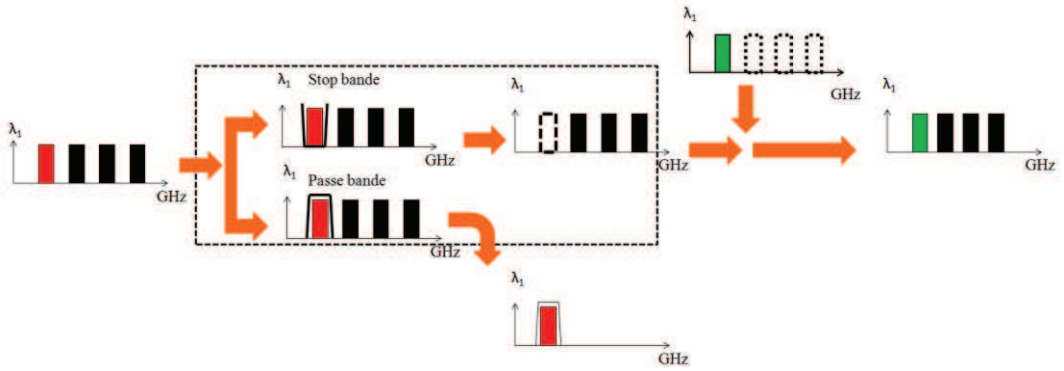


Figure III-2 Exemple d'extraction et d'insertion d'une sous bande dans le réseau multi-bande OFDM

III.3. Brassage de sous-bandes optiques

Nous venons de voir que la structure multi-bande du canal WDM et la forme « rectangulaire » des différentes sous-bandes facilitent les fonctions de filtrage des sous-bandes et permettent par conséquent la fonction de commutation de sous-bandes. La commutation ou brassage de sous-bandes consiste à commuter une ou plusieurs sous-bandes d'un canal WDM j d'une fibre F_l vers un canal WDM j' d'une fibre $F_{l'}$ [38]. C'est une commutation optique intra-canal WDM, c'est-à-dire qu'elle accède à des entités (ici une ou plusieurs sous-bandes) à l'intérieur du canal WDM tout en restant dans le domaine optique. La Figure III-3 illustre un exemple de commutation de sous-bandes. Dans cet exemple, 2 demandes doivent être acheminées : une demande du nœud 1 vers le nœud 3 transportée par la sous-bande bleue $b_{1,1}$ et une demande du nœud 1 vers le nœud 4 transportée par la sous-bande rouge $b_{2,1}$. Dans le nœud 2, chacune des 2 sous-bandes est aiguillée vers une direction donnée : la sous-bande bleue $b_{1,1}$ est aiguillée sur le canal optique WDM associé à la longueur d'onde 1 (λ_1) de la fibre F_2 et la sous-bande rouge $b_{2,1}$ est aiguillée sur le canal optique associé à la longueur d'onde 1 (λ_1) de la fibre F_3. Cette fonction de commutation optique offre la possibilité d'agréger et de désagréger dans un nœud du réseau des demandes tout en restant dans la couche optique.

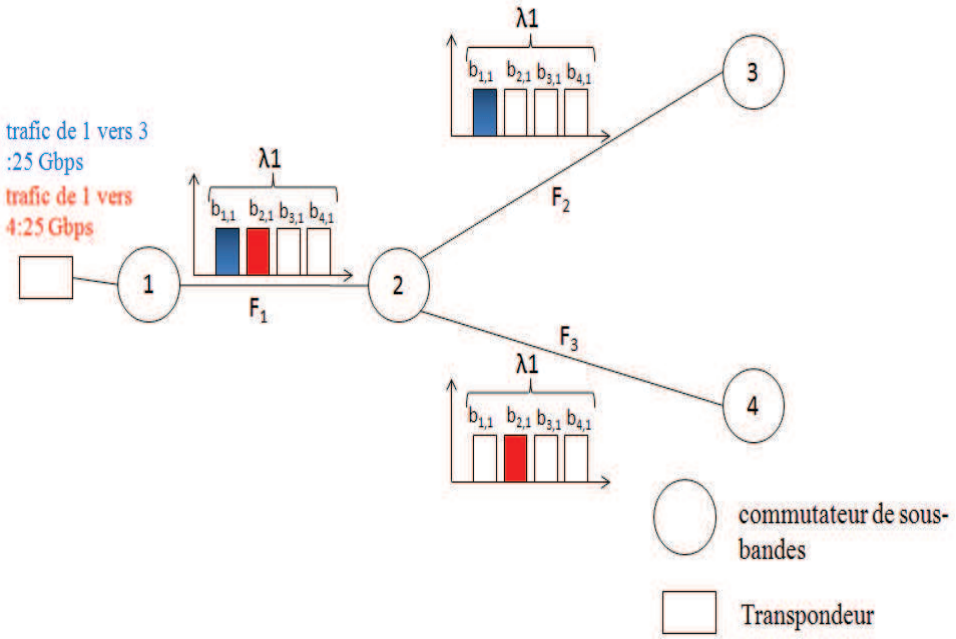


Figure III-3 Commutation de sous-bandes à l'intérieur du nœud 2

La

Figure III-4 présente un exemple d'agrégation et de désagrégation de demandes dans un réseau optique. Dans le cas de la

Figure III-4, nous considérons un canal WDM avec 4 sous-bandes indépendantes. Nous avons 2 demandes de trafic vers le nœud 4 provenant respectivement du nœud 1 et du nœud 2 et une demande vers le nœud 3 provenant du nœud 2. La demande du nœud 2 vers le nœud 4 est transportée par la sous-bande $b_{1,1}$ (sous-bande "bleu"), la demande du nœud 2 vers le nœud 3 est transportée par la sous-bande $b_{2,1}$ (sous-bande "verte") et la demande du nœud 1 vers le nœud 4 est transportée par la sous-bande $b_{2,1}$ (sous-bande "rouge"). Le signal multi-bande OFDM sur lequel on extrait une ou plusieurs sous-bandes (selon le besoin de désagrégation au niveau du nœud 3) passe dans le filtre optique de profil "rectangulaire". Lorsqu'on sélectionne la largeur minimum de la bande passante du filtre, on peut extraire une sous-bande (par exemple la sous-bande "verte"). A l'opposé, lorsque la largeur sélectionnée de la bande passante du filtre est maximale, la totalité du canal est alors extraite. Dans notre exemple la sous-bande $b_{2,1}$ ("verte") est extraite du réseau à sa destination (le nœud 3). La sous-bande $b_{1,1}$ et la sous-bande $b_{2,1}$ provenant du nœud 2 sont donc désagrégées dans le nœud 3. Les 2 sous-bandes sont transportées sur le même canal WDM associé à la longueur d'onde λ_1 vers le nœud 4.

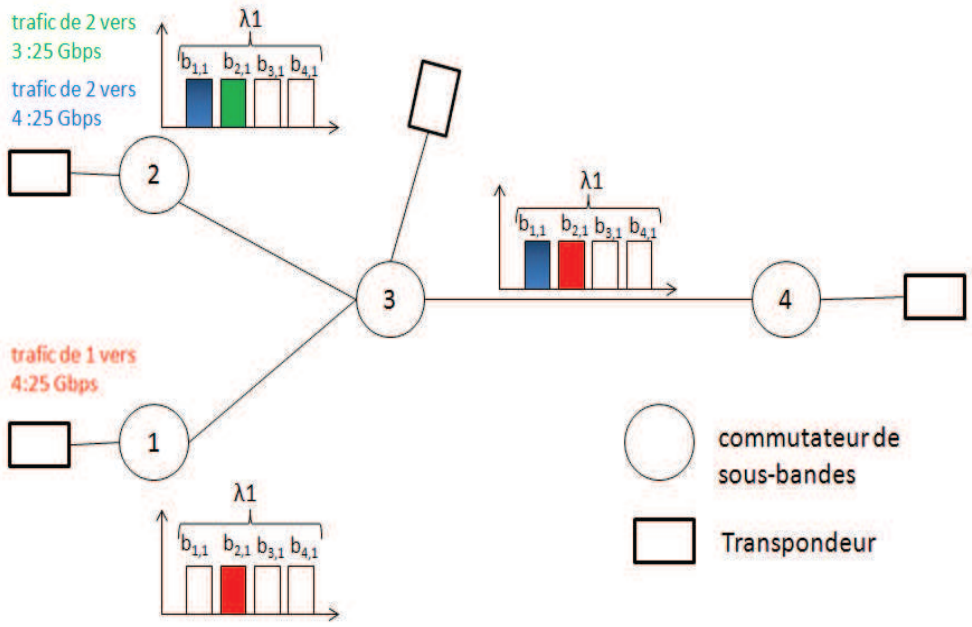


Figure III-4 Agrégation/désagrégation de sous-bandes

Comme nous pouvons le remarquer dans cet exemple, la granularité minimale de brassage optique correspond à la capacité de la sous-bande alors que dans un réseau transparent la granularité correspond au débit du canal WDM. Un commutateur de sous-bandes est donc non seulement capable de brasser les longueurs d'onde au niveau du nœud de commutation, comme c'est déjà le cas aujourd'hui des solutions ROADM associés aux technologies de transmission mono-bande actuellement déployées, mais il est aussi en mesure d'assurer la commutation optique intra-canal WDM des sous-bandes. Cette flexibilité tout optique ne nécessite pas de repasser dans le domaine électronique et offre donc la possibilité de réduire le coût et la consommation énergétique des fonctions d'agrégations/désagrégations.

Néanmoins, la fonction de commutation de sous-bandes doit satisfaire à la contrainte de continuité de longueur d'onde pour éviter de faire intervenir certaines fonctions supplémentaires comme la conversion de longueur d'onde de canaux WDM ou de sous-bandes. En effet, une sous-bande transportée d'un nœud source vers un nœud destination ne peut pas changer de position spectrale à chaque passage par un nœud de commutation sans ces fonctions de conversion. La position spectrale de la sous-bande doit être la même de bout en bout : c'est la contrainte de continuité de longueur d'onde que nous appellerons

simplement "contrainte de continuité" dans la suite de ce mémoire. Pour illustrer cela, reprenons l'exemple de la

Figure III-4 et supposons maintenant que la sous-bande rouge est portée par une longueur d'onde λ_2. Nous la noterons $b_{2,2}$. Lors du passage dans le nœud 3, il serait intéressant d'agréger la sous-bande bleu et la sous-bande rouge afin d'avoir un seul récepteur en nœud 4. Dans ce cas, une conversion de longueur d'onde du canal WDM est nécessaire. Cet exemple montre que le choix des longueurs d'onde et des sous-bandes est crucial pour minimiser de nombre d'émetteurs et récepteurs dans le réseau.
Nous étudierons plus en détails dans le Chapitre IV. , l'impact du déploiement de fonctions de conversion de longueur d'onde dans les réseaux multi-bandes OFDM optiques sur les performances du réseau.

III.4. Adaptation du débit et du nombre de sous bandes dans les réseaux multi-bandes OFDM

La technologie multi-bande OFDM présente deux autres flexibilités intéressantes : l'adaptabilité du débit à la portée et la variation du nombre de sous-bandes par canal WDM. Dans cette section nous exposons ces deux flexibilités.

III.4.1.1. Adaptation du débit à la portée

Une spécificité de la modulation OFDM est son adaptabilité aux conditions physiques de transmission. La transmission sur fibre, cependant, n'offre pas la même variabilité que la transmission radio, et ne nécessite pas un ajustement en continu des modulations et débits des sous porteuses, car les conditions de transmission restent relativement stables sauf en cas de re-routage (par exemple en cas de coupure de fibre). Mais cette faculté reste intéressante d'un point de vue réseau : en effet, comme la portée optique de la sous-bande dépend notamment du débit portée par celle-ci [39], il peut être intéressant d'ajuster le débit d'une sous-bande au trafic réellement transporté en fonction de la portée souhaitée. Par exemple, une demande de

très courte portée pourrait obtenir un débit plus élevé que le débit nominal, le débit nominal étant le débit maximum possible pour une distance typique. Dans le cas où la demande excède le débit possible pour la portée voulue, elle peut être répartie sur plusieurs sous-bandes avec des débits moins importants et des portées plus grandes (grâce à une modulation par sous-porteuses appropriée). Cela évite la régénération dans les nœuds traversés mais au détriment d'une occupation spectrale plus importante. En contrepartie, l'ajustement du débit des sous-bandes doit être prévu au moment du dimensionnement du réseau. Le fait de ne pas savoir si une interface va être capable de transporter un débit donné si on ne connait pas la distance à parcourir est une contrainte plutôt nouvelle. Elle sera donc plus difficile et plus complexe à intégrer dans la planification du réseau.

III.4.1.2. Variation du nombre de sous-bandes

La variation dynamique du nombre de sous-bandes dans un canal WDM en fonction des demandes à transporter, offre également une flexibilité intéressante. Augmenter leur nombre, permettrait d'agréger des demandes dans un seul canal WDM optique avec des granularités plus fines (grâce à un débit par sous-bande plus faible) tout en gardant un débit total constant. Par exemple, pour transporter une demande de 30 Gbit/s, deux scenarios sont envisageables :

- Soit 2 sous-bandes pour un canal multi-bande OFDM composé de 5 sous-bandes chacune de 20 Gbit/s. Dans ce cas, il nous reste trois sous-bandes utilisables (60 Gbit/s) pour transporter une ou plusieurs autres demandes.
- Soit 3 sous-bandes pour un canal OFDM composé de 10 sous-bandes chacune de 10 Gbit/s. Dans ce cas, il nous reste 7 sous-bandes (70 Gbit/s) utilisables pour transporter une ou plusieurs autres demandes.

Comme nous l'avons précisé dans le paragraphe I.1, le nombre de sous-bandes que l'on peut générer dans un canal WDM dépend des performances des convertisseurs analogiques numériques et des contraintes de faisabilité du filtrage optique. D'autre part dans le cas d'une variation dynamique, les différents équipements des réseaux doivent s'adapter. Un commutateur de sous-bandes ne traite pas 4 sous-bandes comme il traite 8 sous-bandes. Dans ce mémoire nous nous intéressons à l'étude de la variation de nombre de sous-bandes avant dimensionnement du réseau.

III.5. Comparaison de la technologie multi-bande OFDM avec la notion de bande de canaux WDM (waveband en Anglais)

Dans cette section, nous exposons la spécificité de la technologie multi-bande OFDM optique par rapport à un concept similaire : la commutation de bande de canaux WDM où « waveband » en anglais [40] [41]. Le principe de « waveband » consiste à grouper des canaux WDM dans des bandes spectrales et de les router comme une seule entité. Cela permet de réduire le nombre de ports au niveau des commutateurs optiques, et, par conséquent le coût et la complexité des commutateurs optiques [42]. Par abus de langage et comme ce terme est généralement utilisé dans les références bibliographiques présentées dans ce mémoire, nous utiliserons cette appellation de "bande de longueur d'onde" dans la suite de ce chapitre, pour représenter un ensemble de canaux WDM de longueurs d'ondes contiguës. Par ce moyen, une paire de port d'entrée/sortie est utilisée à la place de b paires, b étant le nombre de canaux WDM par bande. Les bandes de longueur d'onde peuvent être caractérisées par le système suivant :

$B_i = \{ \lambda_{b*(i-1)+1}, \ldots, \lambda_{b*i} \}$

Avec $B_i \cap B_j = \emptyset$ *si* $i \neq j$

- Soit N le nombre de canaux WDM dans une fibre. b est le nombre de longueurs d'onde dans une bande. Le nombre total de bandes dans une fibre est donné par $W = [N/b]$.
- Bi est l'ensemble des canaux WDM constituant la bande. Le nombre i varie de 1 à $W = [N/b]$
- Deux bandes d'une même fibre n'ont pas de canaux WDM commun.
- $\lambda_{b(i-1)+1}$ représente la première longueur d'onde de la bande B_i.

La notion de commutateur optique hiérarchique a été introduite avec le principe de bande de longueur d'onde. Ce commutateur a la possibilité de traiter soit, la fibre entière, soit, une

bande de longueur d'onde, soit, un canal WDM. La Figure III-5 illustre un commutateur optique à trois niveaux [43].

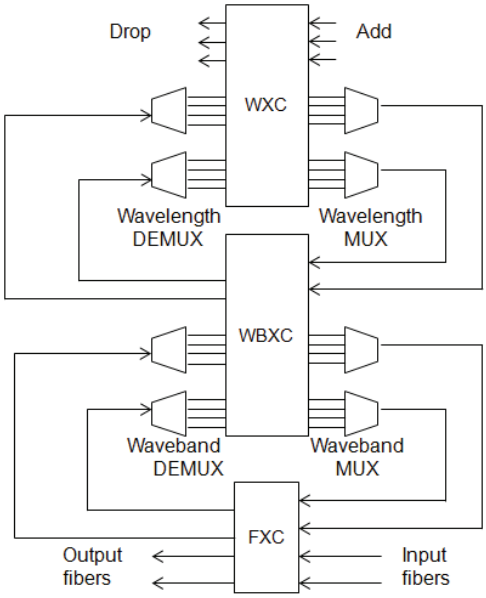


Figure III-5 Commutateur Waveband optique à trois niveaux hiérarchiques

Dans ce commutateur optique hiérarchique, chacun des blocs FXC, WBXC, et WXC est chargé de traiter une granularité optique donnée. Le bloc FXC (Fiber cross-connect) s'occupe d'aiguiller l'ensemble des longueurs d'onde des fibres optiques vers un port donné du commutateur (par abus et pour simplifier disons « aiguiller une fibre »). Si une fibre doit passer en transit, elle est aiguillée par ce bloc vers un port de sortie de ce même bloc. Sinon, si la fibre doit être dé-multiplexée, elle sera aiguillée vers le dé-multiplexeur du bloc WBXC (Waveband cross-connect). Ce bloc traite les bandes de longueurs d'onde. Au niveau de ce bloc, certaines bandes passent en transit à travers ce bloc ; elles sont donc aiguillées vers le Waveband MUX du WBXC pour être re-multiplexé dans la fibre. D'autres sont dé-multiplexées au niveau du WXC (Wavelength cross-connect) afin d'accéder au canal WDM [42]. Au niveau du WXC certains canaux WDM quittent le nœud vers les ports « Drop », d'autres canaux sont aiguillés vers le multiplexeur de canaux WDM (wavelength multiplexer) pour être injectés dans le réseau (« ports Add »). A travers ce schéma de commutateur, nous pouvons dégager une analogie entre la technologie multi-bande OFDM optique et l'approche de bande de longueur d'onde même si les échelles de granularité sont à un ordre de grandeur différent.

Dans l'approche bande de longueur d'onde, dans chaque bloc nous avons accès à un niveau de granularité différent :

- la fibre : constituée par exemple de *N* canaux WDM d'une capacité totale de *N*100* Gbit/s,
- la bande de longueur d'onde : constituée de *b* longueurs d'onde, d'une capacité de. *b*100* Gbit/s,
- le canal WDM de capacité *100* Gbit/s.

Dans l'approche multi-bande OFDM optique, nous avons également 3 niveaux de granularité mais à une échelle différente :

- la fibre : constituée de *N* canaux WDM d'une capacité totale de N*100 Gbit/s,
- le canal WDM constituée de *n* sous-bandes indépendantes, d'une capacité totale de 100 Gbit/s,
- la sous-bande d'une capacité de *100/n* Gbit/s.

L'architecture d'un commutateur multi-bande OFDM optique peut donc s'inspirée de la Figure III-5. Le commutateur de bandes de longueur d'onde sera remplacé par un commutateur de canaux WDM et le commutateur de canaux WDM par un commutateur de sous-bandes. Au niveau de ce dernier, des filtres optiques "rectangulaires" fins sont installés afin de pouvoir réaliser la fonction d'agrégation et désagrégation des demandes.

Dans les deux technologies, nous avons donc accès à trois niveaux de granularité optiques à des débits différents. Le débit minimal auquel nous avons accès dans le cas de la technologie de commutation par bande de longueur d'onde est le débit d'un canal WDM alors que dans le cas multi-bande OFDM c'est le débit de la sous-bande. Dans le cas de la bande de longueur d'onde, nous avons accès à *N* entités par fibre (*N* est le nombre de canaux WDM par fibre). Dans le cas multi-bande OFDM, nous avons accès à *N*n* entités par fibre, ce qui représente le nombre de sous-bandes par fibre. En termes de granularité, les deux technologies seraient identiques si dans le cas des bandes de longueur d'onde on mettait sur une fibre autant de longueurs d'onde que de sous-bandes dans le cas multi-bande OFDM et que le débit des sous-bandes soit égal au débit des longueurs d'onde. La différence réside dans le fait que dans le cas de bande de longueur d'onde, une paire de transpondeurs émet ou reçoit un seul canal WDM alors que dans le cas multi-bande une paire de transpondeur émet et reçoit l'ensemble des sous bandes du canal WDM. Par conséquent si dans un nœud, *n* sous-bandes sont

envoyées dans des directions différentes, ces sous-bandes peuvent être générées par un même transpondeur. De façon identique, au niveau de la réception, des sous-bandes provenant de différentes directions peuvent être reçues par un seul et unique transpondeur si les sous-bandes sont regroupées dans le même canal WDM. Considérons l'exemple de la Figure III-6.

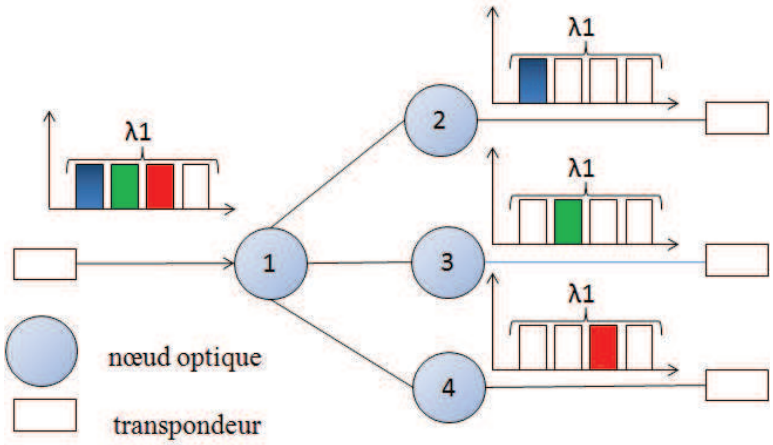


Figure III-6 Utilisation des transpondeurs dans le cas multi-bande OFDM

Nous avons 3 demandes du nœud 1 vers respectivement les nœuds 2, 3 et 4. Chacune des 3 demandes utilise une sous-bande différente. Comme indiqué sur la Figure III-6, les 3 sous-bandes sont générées par un seul transpondeur. Dans le nœud 1, intégrant une fonction de commutation de sous-bandes, les trois sous-bandes sont dissociées et routées chacune vers le nœud approprié. Dans le cas d'une technologie mono-bande ou de bande de longueur d'onde, on aurait utilisé 3 transpondeurs pour générer les trois demandes.

Dans cette section, nous avons décrit/énoncé la différence entre l'approche multi-bande OFDM et l'approche bande de longueur d'onde. Au niveau architecture, il y a une grande similitude entre les deux approches. La première différence concerne le niveau de granularité, plus fin dans l'architecture multi-bande OFDM. La deuxième différence concerne les transpondeurs utilisés respectivement pour générer les sous-bandes et la bande de longueur d'onde. Dans la suite de ce mémoire, nous allons comparer la technologie multi-bande OFDM à des scenarios tendanciels tels que mono-bande opaque et mono-bande transparent détaillés dans le deuxième chapitre. La technologie bande de longueur d'onde n'a pas été considérée lors de nos différentes études. Une comparaison entre cette dernière et la technologie multi-bande OFDM se baserait plus sur l'architecture des nœuds de commutation

optique et le nombre de ports utilisés dans chaque nœud pour véhiculer le trafic. Malheureusement l'architecture des commutateurs de sous-bandes n'a pas encore été définit.

III.6. Etude comparative préliminaire entre les technologies de réseaux multi-bande OFDM, mono-bande transparent et mono-bande opaque

Dans la suite de ce mémoire, nos études se baseront sur la comparaison de 3 technologies : la technologie multi-bande OFDM optique, la technologie mono-bande transparent et la technologie mono-bande opaque. Dans cette section, nous allons comparer les 3 technologies, en utilisant la même topologie et le même trafic sur un seul nœud du réseau (même ensemble de demandes). Avant de commencer l'étude sur un seul nœud du réseau, une étude sur une topologie élémentaire est considérée. Ceci permettrait de situer l'intérêt de la technologie multi-bande OFDM avant d'entamer des études réseaux plus poussées.

III.6.1. Exemple de comparaison entre Multi-bande OFDM optique et mono-bande transparent sur une topologie de réseau élémentaire

Dans cette section, nous démontrons à travers une architecture élémentaire d'un réseau de télécommunication optique, l'intérêt de la technologie multi-bande OFDM par rapport à la technologie mono-bande transparent déjà décrite dans le Chapitre II. La technologie multi-bande OFDM optique permet de :

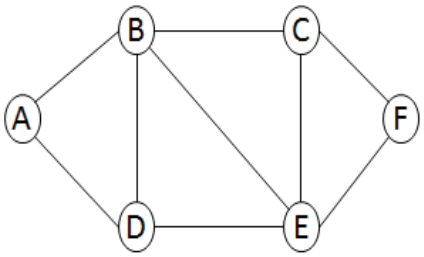
- Agréger/désagréger des demandes grâce à la fonction de commutation de sous-bandes
- Générer/recevoir les sous-bandes d'un même canal WDM par un seul transpondeur

Ces 2 points constituent les principaux atouts de l'approche. Dans l'exemple de la Figure III-7, nous considérons une matrice de trafic qui contient 5 demandes :

- Une demande du nœud A vers le nœud C avec un débit de 10 Gbit/s.
- Une demande du nœud A vers le nœud F avec un débit de 50 Gbit/s.

- Une demande du nœud D vers le nœud C avec un débit de 25 Gbit/s.
- Une demande du nœud E vers le C avec un débit de 30 Gbit/s.
- Une demande du nœud C vers le nœud F avec un débit de 40 Gbit/s.

L'idée ici est de montrer à travers cet exemple simple l'impact de la commutation de sous-bandes et de l'agrégation optique sur le coût de dimensionnement d'un réseau. Pour ce faire nous allons dimensionner le réseau de la Figure III-7.



A->C: $D_1 = 10$ Gbit/s
D->C: $D_2 = 25$ Gbit/s
E->C: $D_3 = 30$ Gbit/s
A->F: $D_4 = 50$ Gbit/s
C->F: $D_5 = 40$ Gbit/s

Figure III-7 Topologie et matrice du trafic du réseau à dimensionner

Nous supposons que les canaux WDM ont chacun un débit de 100 Gbit/s et que chaque canal WDM est composé de 4 sous-bandes indépendantes pouvant transporter un débit maximal de 25 Gbit/s chacune. Soit D_i ,$1 \leq i \leq 5$ le débit des demandes. Chaque demande utilise $\lceil D_i/25 \rceil$ sous-bandes. $\lceil x \rceil$ désigne la partie entière du réel x. Dans cet exemple, nous supposons que le coût du réseau est uniquement lié au nombre de transpondeur utilisé. Le

Tableau III-1 expose pour chaque demande, les sous-bandes utilisées ainsi que le chemin emprunté.

Demandes	Nombre de sous-bandes utilisées	Chemin emprunté par la demande	Sous-bandes utilisées
A->C	1 sous-bande	A->B->C	$b_{1,1}$,
D->C	1 sous-bande	D->B->C	$b_{2,1}$
E->C	2 sous-bandes	E->C	$b_{3,1}$, $b_{4,1}$

A->F	2 sous-bandes	A->B->C->F	$b_{3,1}$, $b_{4,1}$
B->F	2 sous-bandes	B->E->F	$b_{2,1}$, $b_{1,1}$

Tableau III-1 distribution du trafic

La sous-bande $b_{i,j}$ désigne la sous-bande *i* du canal WDM *j*. Les sous-bandes sont choisies de façon à utiliser le minimum de transpondeurs en émission et en réception en tenant compte de la contrainte d'allocation des sous-bandes (une sous-bande ne peut être allouée qu'à une seule demande sur une fibre donnée). Ce cas simple peut être calculé facilement mais nous verrons, dans le chapitre V, un cas de dimensionnement se basant sur un trafic plus important et une topologie de réseau représentative de celui d'un opérateur. Dans le cas de la Figure III-7, nous pouvons décrire ce qui se passe dans les nœuds par lesquels passe le trafic :

- Nœuds d'émission A, D, E et B : Dans chaque nœud le nombre de sous-bandes utilisées ne dépasse pas le nombre maximal de sous-bandes que peut émettre un transpondeur. Chaque nœud utilise donc un seul transpondeur pour satisfaire l'ensemble des demandes. Pour l'émission, nous utiliserons donc au total quatre transpondeurs.
- Nœuds de réception C et F : le nœud C reçoit 3 demandes provenant de A, D et E. les demandes A->C et D->C sont agrégées ensemble dans le nœud de transit B qui constitue un point de passage commun aux deux demandes. Ces deux demandes sont par la suite agrégées au niveau du nœud C avec la demande E->C. Le nœud C reçoit donc 4 sous-bandes disjointes d'un même canal WDM. Un seul transpondeur est installé dans le nœud C pour recevoir les 3 demandes. Le nœud F reçoit 2 demandes utilisant chacune deux sous-bandes. Les deux demandes provenant respectivement de A et de B seront agrégées dans le nœud F sur un même canal WDM. Un seul transpondeur sera aussi utilisé dans le nœud F afin de réceptionner les deux demandes.

Au totale 6 transpondeurs seront installé pour transporter le trafic. Reprenons la même matrice de trafic dans le cas d'un réseau mono-bande transparent. Chaque demande utilise dans ce cas une paire de transpondeurs (un au nœud source et un autre au nœud destination). Au total, dix transpondeurs seront donc utilisés pour véhiculer le trafic proposé dans Figure III-7. Pour ce trafic et la topologie proposée, la technologie multi-bande OFDM optique réduit donc de 40 % le nombre de transpondeurs utilisés. Réduire le nombre de transpondeurs peut

avoir un impact direct sur le coût du réseau. Cela dépendra du coût du transpondeur multi-bande par rapport au coût du transpondeur mono-bande.

Soit $C_{multi\text{-}bande}$ et $C_{mono\text{-}bande}$, les coûts respectifs d'un transpondeur multi-bande OFDM et un transpondeur mono-bande. Nous supposons que $C_{multi\text{-}bande} = a * C_{mono\text{-}bande}$ avec $a>1$. En effet, un transpondeur multi-bande OFDM est plus complexe à réaliser qu'un transpondeur mono-bande, par conséquent nous supposons que son coût est supérieur. Dans l'exemple de la Figure III-7, pour que le coût en nombre de transpondeur d'un réseau multi-bande OFDM soit inférieur au coût d'un réseau mono-bande transparent, il faut donc que $1<a<\frac{\text{nb mono-bande}}{\text{nb multi-bande}}$, avec $\text{nb}_{\text{mono-bande}}$ et $\text{nb}_{\text{multi-bande}}$ le nombre respectif de transpondeurs utilisé pour acheminer le trafic dans le cas mono-bande et dans le cas multi-bande OFDM.

Nous verrons dans le 0les différentes architectures considérées pour les transpondeurs multi-bandes OFDM. A partir de ces architectures nous étudierons le dimensionnement des réseaux multi-bandes OFDM dans le but de comparer le coût d'un réseau multi-bande OFDM avec celui des deux réseaux mono-bande identifiés.

III.6.2. Hypothèses pour l'étude préliminaire sur un seul nœud

Dans cette étude préliminaire, l'évaluation des trois technologies est faite sur un seul nœud. Cette étude permettra de situer la technologie multi-bande OFDM optique par rapport aux technologies tendancielles. Le trafic traversant un nœud du réseau peut être de trois types différents :

- Le trafic « Add » : il représente le trafic inséré par le nœud dans le réseau.
- Le trafic « Drop » : il représente le trafic extrait par le nœud du réseau.
- Le trafic « Transit » : il représente le trafic en passage par un nœud

Nous définissons ici les trois scenarios évalués :

Scénario S_1 mono-bande transparent : Dans ce type de nœud, le trafic optique en transit n'est pas converti en électrique, il traverse le nœud d'une façon transparente. Les conversions optoélectroniques sont seulement utilisées pour extraire (trafic « Drop ») ou insérer (trafic « Add ») du trafic dans le réseau. Dans ce type de nœud, chaque demande utilise un canal WDM. Par exemple une demande en transit par un nœud ne peut en aucun cas partager un

canal optique avec une demande insérée par le nœud dans le réseau. A la sortie du nœud chaque demande utilisera un canal WDM.

Scénario S_2 mono-bande opaque : Dans ce type d'architecture les conversions optoélectroniques sont systématiques dans chaque nœud. Les convertisseurs optoélectroniques sont utilisés pour désagréger un trafic en transit et un trafic « Drop » ou bien pour agréger un trafic « Transit » et un trafic « Add ». Même si dans un nœud on a seulement un trafic « transit », les convertisseurs optoélectroniques sont aussi systématiquement utilisés. La granularité minimale dans le cas opaque est l'entité minimale traitable par l'équipement de routage électrique, pour simplifier nous la fixons à 1Gbit/s.

Scénario S_3 multi-bande OFDM optique : Dans cette étude préliminaire nous supposons que le canal WDM multi-bande est composé de $n=5$ sous-bandes. Chaque sous-bande peut transporter un débit maximal $D_b= 20\ Gbit/s$. Dans ce cas d'étude, nous considérons seulement la fonction de commutation de sous-bandes comme seule flexibilité offerte par la technologie multi-bande OFDM. Une demande peut être transportée par une ou plusieurs sous-bandes en fonction de son débit. Les demandes en transit sont routées d'une manière transparente d'un port d'entrée vers un port de sortie. Elles peuvent être agrégées avec des demandes injectées dans un nœud ou bien désagrégées des demandes retirées dans le nœud. Les opérations d'agrégation/désagrégation se font à la granularité de la sous-bande d'une manière totalement transparente contrairement aux nœuds opaques. La Figure III-8 illustre le comportement des 3 différentes types de nœud avec le trafic à traiter. Prenons dans chaque cas deux demandes D_1 et D_2. Le débit de chaque demande ne dépasse pas le débit d'une sous-bande. Le choix des couleurs des longueurs est arbitraire. Dans le cas opaque la demande D_1 en transit par le nœud est agrégée dans le domaine électrique avec la demande D_2 injectée par le nœud dans le réseau. Un seul canal WDM est utilisé à la sortie du nœud. Dans le cas du nœud transparent les deux demandes D_1 et D_2 sont routées séparément et chaque demande utilise un canal WDM différent à la sortie du nœud. Il n'y a aucun moyen d'agréger les deux demandes. Concernant le cas multi-bande OFDM, les deux demandes peuvent être agrégées ensemble sur le même canal WDM tout en restant dans le domaine optique.

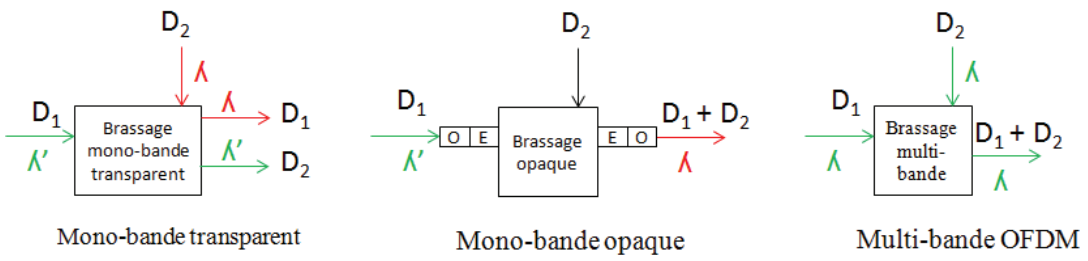


Figure III-8 Comportement des différents types de nœud

III.6.3. Critères de comparaison

Comme expliqué dans la section III.1 du Chapitre II. , le but de la technologie multi-bande est de réduire le coût de l'agrégation/désagrégation et de minimiser le nombre d'interface optoélectronique. Pour déterminer le potentiel de cette technologie par rapport au cas mono-bande transparent et mono-bande opaque, nous avons choisis comme critères de comparaisons le nombre de canaux WDM et le nombre d'interfaces optoélectroniques utilisés pour véhiculer le trafic. Le nombre de canaux WDM et le nombre d'interfaces optoélectroniques utilisés varient pour les trois technologies et dépend du nombre de demandes et de leurs débits.

Le scénario S_1 (mono-bande transparent) peut avoir l'avantage de réduire l'utilisation des conversions optoélectroniques par rapport au scenario S_2 (mono-bande opaque). Ceci est principalement dû au fait que dans le cas du scenario S_1 le trafic en transit n'est pas converti en électrique. Dans le scénario S1 chaque demande à établir utilise un canal WDM. Le scénario S_1 utilise donc plus de canaux WDM que le scénario S_2. Le scénario S_3 permet de faire de l'agrégation/désagrégation tout optique à la granularité de la sous-bande. Il peut donc être vu comme un compromis entre les scénarios S_1 et S_2 en termes d'utilisation de ressources (canaux WDM) et d'interfaces optoélectroniques. Soit $\{a_i,\ 0 \leq i \leq A$ *avec* A le nombre total de trafic à insérer dans le nœud$\}$ l'ensemble des demandes insérées dans un nœud vers une direction donnée ; $\{t_j,\ 0 \leq j \leq T$ *avec* T le nombre total de trafic en transit par le nœud$\}$ l'ensemble des demandes en transit par un nœud ; $\{d_k,\ 0 \leq k \leq \Delta$ avec Δ le nombre totale de trafic extrait dans le nœud$\}$ l'ensemble des demandes qui vont être extraites dans un nœud (demandes dont le nœud considéré est la destination), N le nombre de canaux WDM dans

une fibre ; D le débit par canal WDM ; D_b est le débit de chaque sous-bande. Nous avons par définition $D=n*D_b$, n étant le nombre de sous-bandes par canal WDM.

III.6.3.1. Nombre de longueurs d'onde utilisées

Nous allons, ici, formuler le nombre de canaux WDM (NC) utilisé dans un nœud en fonction des trois types de trafic et pour les trois technologies proposées.

Pour le scenario S_1 (nœud transparent) le nombre de canaux WDM nécessaire pour transporter le trafic est la somme du nombre de canaux nécessaire pour transporter le trafic injecté dans le nœud et le nombre de canaux nécessaires pour transporter le trafic en transit par le nœud:

$$NC(S_1)=\sum \lceil a_i/D \rceil + \sum \lceil t_j/D \rceil \text{ avec } 0\leq i \leq A \text{ et } 0\leq j \leq T \qquad \textbf{Équation III-1}$$

Pour le scenario S2 (nœud opaque) le nombre de canaux WDM utilisé par port de sortie est :

$$NC(S_2)= \lceil \sum a_i/D + \sum t_j/D \rceil \text{ avec } 0\leq i \leq A \text{ et } 0\leq j \leq T \qquad \textbf{Équation III-2}$$

Pour le scenario S3 (nœud multi-band OFDM optique) le nombre de canaux WDM utilisé par port de sortie est :

$$NC(S_3)= \lceil 1/n\sum \lceil a_i/D \rceil +1/n \sum \lceil t_j/D \rceil \rceil \text{ avec } 0\leq i \leq A \text{ et } 0\leq j \leq T \qquad \textbf{Équation III-3}$$

$\lceil x \rceil$ désigne la partie entière supérieure du réel x. En appliquant cette formulation, nous supposons que les différentes demandes sont groupées de telle façon à utiliser un nombre minimal de canaux WDM en sortie du nœud indépendamment de leur destination.

III.6.3.2. Nombre d'interfaces électriques utilisés dans un nœud

Pour le scénario S_1 (mono-bande transparent) le nombre d'interfaces électriques (NE) utilisé par port de sortie est :

$$NE(S_1)=\sum \lceil a_i/D \rceil + \sum \lceil d_k/D \rceil \text{ avec } 0\leq i \leq A \text{ et } 0\leq k \leq \Delta \qquad \textbf{Équation III-4}$$

$NE(S_1)$ est la somme des interfaces optoélectroniques utilisées pour émettre le trafic Add et les interfaces optoélectroniques utilisées pour recevoir le trafic Drop.

Pour le scénario S_2 (mono-bande opaque) le nombre d'interfaces électriques utilisé par port de sortie est :

$$NE(S_2) = \Sigma \lceil a_i/D \rceil + \Sigma \lceil d_k/D \rceil + \lceil \Sigma\, a_i/D + \Sigma\, t_j/D \rceil + \lceil \Sigma\, d_k/D + \Sigma\, t_j/D \rceil$$

avec $0 \leq i \leq A$, $0 \leq k \leq \Delta$ et $0 \leq j \leq T$ **Équation III-5**

$NE(S_2)$ est la somme des interfaces optoélectroniques utilisées pour émettre le trafic Add avec les interfaces optoélectroniques utilisées pour recevoir le trafic Drop et les interfaces optoélectroniques utilisées pour convertir le trafic en transit.

Pour le scénario S3 (multi-bande OFDM optique) le nombre d'interfaces électriques utilisé par port de sortie est :

$$NE(S_3) = \lceil \Sigma\, a_i/D_b + \Sigma\, d_k/D_b \rceil \text{ avec } 0 \leq i \leq A \text{ et } 0 \leq k \leq \Delta$$ **Équation III-6**

Comme dans le scénario S_1, dans ce scenario S3 les interfaces optoélectroniques sont seulement utilisées pour insérer ou extraire du trafic dans le réseau. Le trafic en transit passe d'une façon transparente à travers le nœud.

III.6.4. Analyse et discussion des résultats

Nous allons ici étudier les différentes formulations proposées dans la section III.6.3 Notons d'abord que d'après les équations de calculs du nombre de canaux $NC(S_2) \leq NC(S_3) \leq NC(S_1)$. Comme attendu, pour une quantité de trafic donné, le scenario S_2 utilise moins de canaux WDM que les scénarios S_1 et S_3. Ceci est dû au fait que dans le scenario S_2 nous avons une totale flexibilité pour agréger des demandes dans un même canal WDM. En effet, la granularité dans le cas mono-bande opaque est de l'ordre de 1 Gbit/s alors qu'elle est de D (débit d'un canal WDM) pour le scénario S1 et D_b (débit d'une sous-bande) pour le scénario S_3. Le nombre de canaux WDM utilisé dans le scénario S_3 (Cas multi-bande OFDM optique) se situe entre les scenarios S_1 et S_2. En effet, dans le scénario S_3 nous avons accès, comme dans S_2, à une granularité plus fine que celle du canal WDM grâce aux sous-bandes mais plus grosse que celle offerte dans les nœuds opaques. Afin d'appuyer ces constations nous proposons une application numérique aux équations $NC(S_1)$, $NC(S_2)$ *et* $NC(S_3)$. Pour ce faire nous supposons que pour les trois scenarios nous avons un seul trafic en transit de 20 Gbit/s. Nous faisons varier le nombre de trafic injecté dans le nœud. Pour a_i donné nous faisons varier i de 1 à 6. Pour ces hypothèses de trafic nous traçons dans la

Figure III-9 le nombre de canaux WDM utilisé pour chaque scenario.

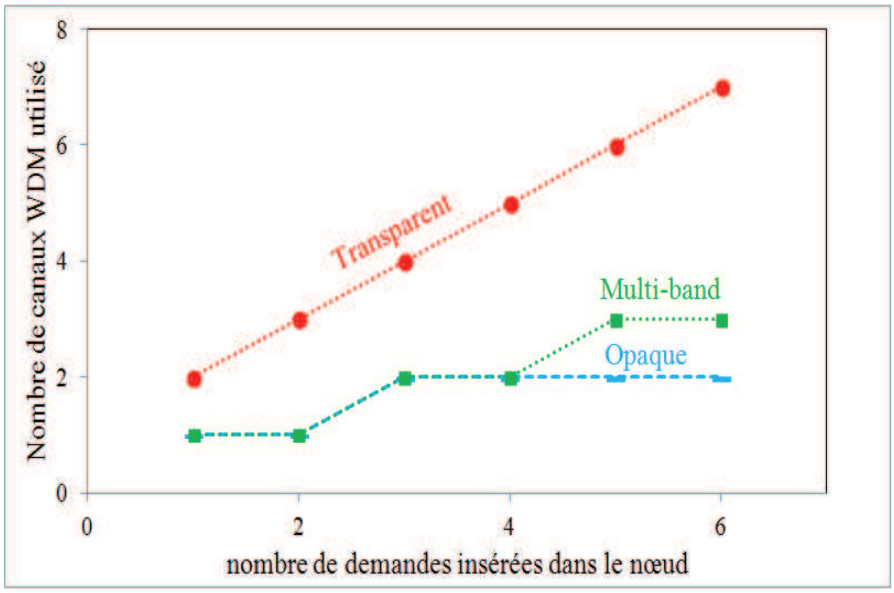


Figure III-9 Nombre de canaux WDM utilisés à la sortie d'un nœud en fonction d'un exemple de trafic add (a_i)

Concernant les interfaces électriques, nous obtenons : $NE(S_1) \leq NE(S_2)$. Le scénario S_1 (mono-bande transparent) utilise moins d'interfaces électriques que les scénarios S_2 (mono-bande opaque). Pour le comptage des interfaces électriques dans le cas multi-bande nous distinguons deux façons : soit nous considérons une interface électrique par sous-bandes soit une interface électrique par canal multi-bande. Nous proposons ici d'analyser les deux cas.

III.6.4.1. Hypothèses pour le calcul des interfaces électriques

La comparaison entre S_2 et S_3 dépend des valeurs de D, D_b, a_i, d_k, et t_j. Par exemple, s'il n'y a pas de trafic en transit par le nœud considéré et si le débit de la demande a_i dépasse le débit d'une sous-bande D_b, nous aurons $NE(S_2) \leq NE(S_3)$. Par contre si nous n'avons que du trafic en transit alors $NE(S_3) \leq NE(S_2)$. Dans les cas intermédiaire, Il faut donc étudier l'évolution de $NE(S_2)$ et $NE(S_3)$ en fonction du ratio de transit $\Sigma t_j/(\Sigma a_i + \Sigma t_j)$. Ce dernier représente la quantité du trafic en transit par rapport à la quantité du trafic inséré dans un nœud. Pour l'application numérique des formules ci-dessous nous nous sommes basés sur les hypothèses suivantes :

- Le débit de chaque canal WDM est D=100 Gbit/s.
- Nous considérons dans un premier temps des demandes utilisant la totalité du canal optique et par conséquent des trafics a_i, t_j et d_k de 100 Gbit/s. Dans un second temps nous considérons des demandes de 50 Gbit/s. Ces choix de débit permettront d'avoir deux scenarios : un premier scenario où aucune agrégation ne peut être faite car chaque demande nécessite la totalité du débit d'un canal WDM et un second favorisant l'agrégation des demandes étant donné que chaque demande n'utilise qu'une partie du débit du canal WDM.

III.6.4.2. Cas où une interface électrique par sous-bandes est considérée

Si pour le cas multi-bande OFDM nous considérons les interfaces électriques par sous-bande alors $NE(S_1) \leq NE(S_3)$. Le cas mono-bande transparent utilise moins d'interfaces électriques que le cas multi-bande OFDM. Par contre la comparaison entre le cas mono-bande opaque et le cas multi-bande OFDM dépend du ratio de transit $\Sigma t_j/(\Sigma a_i + \Sigma t_j)$. D'abord nous traçons dans la Figure III-10 le nombre d'interfaces électriques pour chacun des scenarios mono-bande opaque et multi-bande OFDM lorsque le débit des demande insérée et en transit dans le nœud est de 100 Gbit/s.

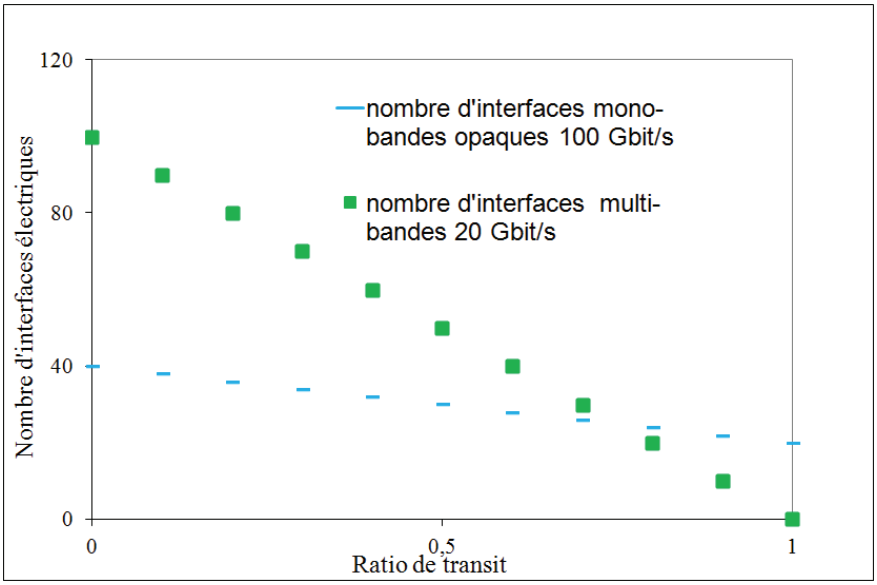


Figure III-10 nombre d'interface électrique en fonction de ration de transit dans le cas où une interface par sous-bande est considérée pour des demandes de débit de 100 Gbit/s

Par la suite nous traçons dans la Figure III-11 le nombre d'interfaces électriques pour chacun des scenarios opaque et multi-bande OFDM lorsque le débit des demandes en transit et insérée dans le nœud est de 50 Gbit/s.

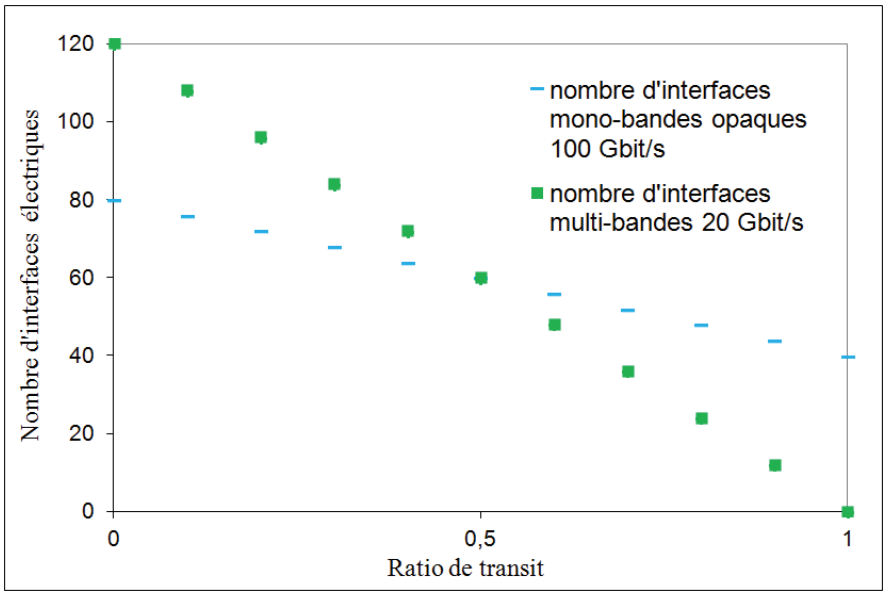


Figure III-11 nombre d'interface électrique en fonction de ratio de transit dans le cas où une interface par sous-bande est considérée pour des demandes de débit de 50 Gbit/s

D'après les résultats des figures précédentes, l'intérêt de la technologie multi-bande OFDM optique diminue avec le remplissage du canal WDM et que La technologie multi-bande OFDM est d'autant plus intéressante que le transit est important. En effet le trafic en transit passe d'une façon transparente à travers le nœud et peut être agrégé avec le trafic ADD sans recours à des conversions optoélectronique. Ces opérations d'agrégation se passe en électrique dans le cas mono-bande opaque.

III.6.4.3. Cas où une Interfaces électrique par canal WDM multi-bande est considérée

i. Cas où les demandes sont à 100 Gbit/s

Dans un premier nous calculons le nombre d'interfaces électriques pour les différents scenarios dans le cas où toutes les demandes sont à 100 Gbit/s. les résultats sont exposés dans la Figure III-12.

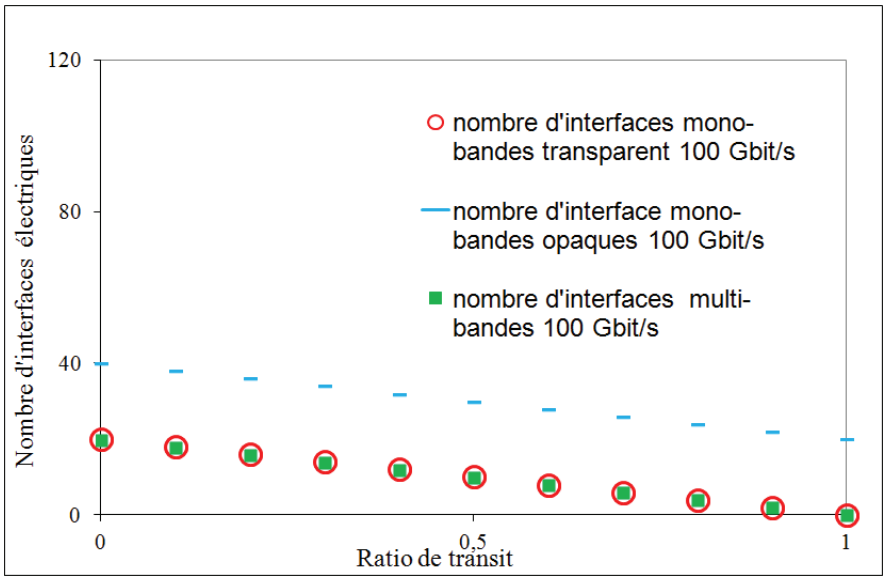


Figure III-12 nombre d'interface électrique en fonction de ratio de transit dans le cas où une interface par canal multi-bande est considérée pour des demandes de débit de 100 Gbit/s

Le cas multi-bande OFDM et le cas mono-bande transparent utilise moins d'interfaces à 100 Gbit/s que le cas mono-bande opaque. Ceci est dû au fait que le trafic en transit par le nœud n'est pas converti en électrique. Pour le débit de demandes proposé, le cas multi-bande OFDM et le cas mono-bande transparent utilisent le même nombre d'interfaces électriques à

100 Gbit/s. En effet quand toute la capacité du canal WDM est utilisée l'agrégation/désagrégation des sous-bandes n'est pas utilisés. Le cas multi-bande OFDM se comporte comme le cas mono-bande transparent.

ii. Cas où les demandes sont à 50 Gbit/s

Nous calculons le nombre d'interface électrique pour les différents scenarios dans le cas où toutes les demandes sont à 50 Gbit/s. les résultats sont exposés dans la Figure III-13. Le cas multi-bande OFDM et le cas mono-bande transparent utilisent toujours moins d'interfaces à 100 Gbit/s que le cas mono-bande opaque. Dans ce cas l'intérêt de la technologie multi-bande OFDM est plus mis à l'avant. En effet puisque les demandes sont à 50 Gbit/s, nous pouvons agréger dans un canal WDM au plus 2 demandes et par conséquent moins de canaux WDM sont utilisés. Grace à cette étude sur un seul nœud, nous avons montré que la technologie multi-bande est une sorte de compromis entre le cas transparent et le cas opaque. En effet la technologie multi-bande utilise moins de ressources que le cas mono-bande transparent et moins d'interfaces électriques (dans certains cas) que le cas mono-bande opaque. Nous allons maintenant étendre cette étude et l'appliquer à une topologie de réseau complète pour vérifier si les premières conclusions sur ce cas simple peuvent être étendues à un réseau concret.

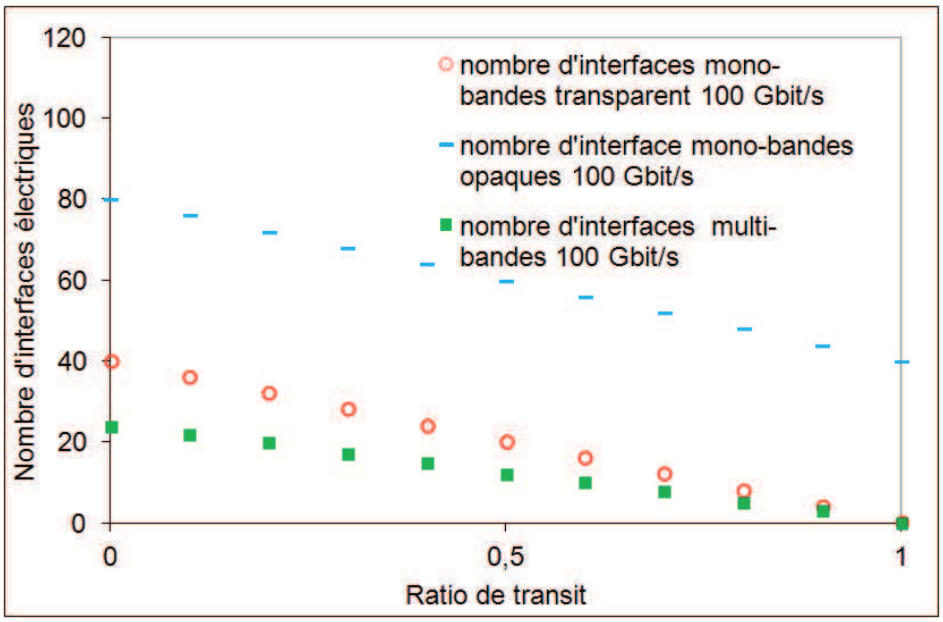


Figure III-13 nombre d'interface électrique en fonction de ratio de transit dans le cas où une interface par canal multi-bande est considérée pour des demandes de débit de 50 Gbit/s

III.7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la technologie multi-bande OFDM optique. Nous avons introduit la notion de brassage de sous-bandes ainsi qu'un élément clef pour sa mise en œuvre : le filtrage optique. Les filtres optiques nécessaires pour extraire une ou plusieurs sous-bandes doivent avoir une largeur spectrale fine (de l'ordre de quelques GHz) ainsi qu'une forme spectrale particulièrement rectangulaire. Nous avons exposé les atouts de cette technologie et ce qu'elle apporte par rapport à la technologie de bande de longueurs d'onde. A travers des exemples simples nous avons montré que contrairement à la technologie bande de longueurs d'onde où b transpondeurs sont nécessaires pour générer une bande de longueur d'onde constituée de b canaux WDM, la technologie multi-bande OFDM nécessite un seul transpondeur pour générer un canal WDM composé de *n* sous-bandes. Nous avons ensuite effectué une étude préliminaire au niveau réseau des fonctions d'agrégation/désagrégation des sous bandes offertes la technologie multi-bande OFDM optique. Nous avons comparé cette dernière au cas mono-bande opaque et mono-bande transparent. Une étude, faite sur un seul nœud, a également montré que la technologie multi-bande OFDM pouvait présenter des avantages en termes de nombres d'interfaces électriques par rapport aux solutions concurrentes et qu'elle pourrait être un bon compromis entre les scénarios mono-bande opaque et mono-bande transparent. Pour approfondir cette analyse, le Chapitre IV. présentera une étude de performances réseaux de la technologie multi-bande OFDM en utilisant une topologie de réseau de transport optique ainsi qu'un trafic représentatif d'un réseau d'opérateur.

Chapitre IV. **Etude de performances de la technologie multi-bande OFDM**

IV.1. Introduction

Dans ce chapitre nous comparons les performances réseau des approches multi-bandes OFDM, mono-bande opaque et mono-bande transparent définis au chapitre II et chapitre III. L'objectif est de déterminer, sous quelles conditions, les réseaux utilisant une technologie multi-bande OFDM peuvent être avantageux en termes de performance. L'indicateur de performance choisi est le taux de blocage dans le réseau [44] [45]. Cet indicateur a été choisi car il permet de bien montrer l'intérêt de la commutation intra-canal. Pour effectuer ces comparaisons, nous proposons un modèle de simulation que nous appliquons aux différentes architectures proposées (mono-bande opaque, mono-bande transparent et multi-bande OFDM optique). Le simulateur utilise en entrée plusieurs paramètres dont le nombre de sous-bandes, le nombre de longueurs d'onde, le débit des longueurs d'onde, le trafic, la topologie et fournit en sortie les performances des trois architectures proposées. Par la suite nous faisons varier certains paramètres comme le nombre de sous-bandes et le débit des sous-bandes, et nous étudions l'impact de ces variations sur les performances de la technologie multi-bande OFDM. Dans un premier paragraphe nous décrivons brièvement le simulateur d'événement discret OMNET++ utilisé pour modéliser nos réseaux. Nous décrivons ensuite les hypothèses de simulations avant de détailler le fonctionnement du modèle de simulation pour les différentes architectures étudiées. Le paragraphe suivant expose les résultats de simulations pour chaque architecture étudiée. Il présente aussi l'impact du déploiement d'une fonction de conversion de longueur d'onde et étudie l'impact de la variation du nombre de sous-bandes et de la topologie sur les performances de la technologie multi-bande OFDM. Enfin, le dernier paragraphe présente les contraintes technologiques inhérentes au découpage en sous-bandes du canal WDM.

IV.2. Modèle de simulation

Les simulations présentées dans ce manuscrit sont réalisées grâce à un simulateur d'évènements discrets basé sur le langage C++ : OMNET++. Le choix de faire des études de performances sous forme de simulation et non de formulation mathématique justifie l'utilisation de ce type de simulateur. En effet, la résolution mathématique devient trop complexe à faire en un temps raisonnable et ne peut pas permettre de traiter des instances réelles. Au sein de France Telecom une autre thèse est en cours pour faire de la modélisation mathématique de la technologie multi-bande OFDM. Les modèles mathématiques développés permettent de traiter des instances avec des matrices de trafic faible par rapport à ce qui est envisageable d'ici une dizaine d'années. Nous avons conçu et développé différents modèles de simulation afin d'étudier les trois architectures de réseaux proposées vis-à-vis des performances en termes de blocage. Le principe de fonctionnement d'OMNET++ [46] repose sur l'interconnexion de différents blocs fonctionnels complexes dont les fonctions se déclenchent à l'arrivée de différents événements. Les blocs fonctionnels complexes sont constitués de modules fonctionnels simples réalisant les différentes tâches du bloc fonctionnel complexe. Le fonctionnement des différents modules est décrit par le langage de programmation C++. Les différents modules et les liens d'interconnexions sont quant à eux définis par un langage propre à OMNET++ : le langage NED. Par exemple, pour modéliser un nœud du réseau optique, nous définissons un bloc fonctionnel complexe simulant le comportement de ce nœud. Ce bloc fonctionnel complexe est constitué de plusieurs modules simples (émetteur, récepteur et commutateur optique). Les différents modules complexes sont reliés entre eux par des liens d'interconnexions. Ces liens jouent le rôle des fibres optiques reliant les nœuds du réseau et servent à la transmission des événements entre les nœuds. Dans nos simulations, ces événements représentent l'apparition des demandes de trafic échangées entre les nœuds. La Figure IV-1 illustre un exemple de modélisation d'interconnexion entre 2 nœuds. Les nœuds 1 et 2 sont 2 modules complexes constitués de 3 modules simples (émetteur, récepteur et commutateur optique). Les nœuds sont reliés entre eux par fibre optique. La modélisation de la fibre est exposée dans la section IV.4. Pour simuler un réseau de transport optique, un module simulant le comportement du nœud du réseau est d'abord

crée. Puis les liens d'interconnexion reliant les différents nœuds du réseau sont aussi créés conformément à la topologie choisie.

Figure IV-1 Interconnexion des modules dans le simulateur Omnet++

IV.3. Hypothèses de simulation

Les hypothèses utilisées pour le réseau concernent le trafic, la topologie, mais aussi la structure des liens et celle des nœuds. Dans cette section nous exposons les différentes hypothèses prises en compte par le simulateur.

IV.3.1. Hypothèses générales

i. Hypothèse sur les canaux de transmission WDM

L'étude menée prend en considération des canaux WDM dont le débit est de 100 Gbit/s. Aujourd'hui, cette technologie de transmission commence à être déployée dans les réseaux [47] afin de répondre à l'augmentation du volume de trafic. Actuellement le nombre de canaux WDM par fibre optique est typiquement de 80. Afin de réduire le temps de simulation, le nombre de canaux WDM par fibre optique que nous avons considéré dans les simulations est limité à 10.

ii. Hypothèse sur les demandes

Dans cette étude, chaque demande de connexion requiert un débit variant entre 1 Gbit/s et 100 Gbit/s (par pas de 1 Gbit/s). Chaque demande entre un nœud source et un nœud

destination correspond à plusieurs services préalablement agrégés au niveau des couches supérieures qui sont les couches clientes. Le débit de chaque demande est tiré aléatoirement suivant une loi uniforme.

iii. Hypothèse sur l'affectation des ressources

Comme expliqué dans le chapitre II, dans un réseau tout optique (transparent), une demande de connexion optique requiert la continuité des canaux WDM le long de la suite de fibres optiques chargée de supporter cette demande. Pour le cas multi-bande OFDM et le cas mono-bande transparent, cette contrainte de continuité est respectée (par définition en fait). En effet dans ces deux cas, pour qu'une demande puisse être établie, il faut qu'il existe des ressources disponibles continues de bout en bout. Pour le cas mono-bande transparent, il est indispensable que le canal WDM reste inchangé de bout en bout. Pour le cas multi-bandes OFDM, il faut que l'ensemble des sous-bandes transportant la demande reste inchangé de bout en bout. Cette contrainte de continuité n'existe pas dans le cas d'un réseau mono-bande opaque puisque le signal optique est converti en électrique à chaque passage dans un nœud. Par conséquent chaque demande peut changer de canal WDM sur chaque lien du chemin emprunté par la demande.

L'affectation des ressources (sous-bandes ou longueur d'onde) sera traitée successivement dans les 3 types d'architecture de réseaux optiques étudiés : le cas mono-bande transparent, le cas multi-bande OFDM, et le cas mono-bande opaque. Dans les cas mono-bande opaque et mono-bande transparent les ressources sont les canaux WDM. Dans le cas multi-bande OFDM les ressources sont les sous-bandes. Il existe plusieurs manières d'affecter des ressources dans les réseaux optiques [48] [49]. Nous en citons quelques-unes :

- Affectation aléatoire : L'algorithme d'affectation choisit aléatoirement, suivant une distribution uniforme, une ressource parmi celles disponibles sur tout le chemin optique.
- Algorithme de la ressource la plus utilisée « most-used » : La ressource libre et qui est utilisée sur le plus grand nombre de liens sur le réseau est choisie pour établir la demande.

- Algorithme de la ressource la moins utilisée « least-used » : La ressource libre et qui est utilisée sur le plus petit nombre de liens sur le réseau est choisie pour établir la demande.
- Algorithme « first fit » : L'algorithme « first fit » consulte séquentiellement l'état des ressources et choisit la première ressource disponible permettant de satisfaire une demande donnée.

Dans notre modèle de simulation, l'algorithme d'affectation de ressources utilisé est l'algorithme « first-fit ». Cet algorithme a été choisi arbitrairement. En effet, L'objectif de notre étude n'est pas de comparer toutes les méthodes d'affectation des ressources mais d'en choisir une seule et de l'utiliser pour les trois architectures étudiées.

Dans le cas mono-bande transparent, lorsqu'une demande doit être établie entre deux nœuds du réseau, le simulateur calcule le plus court chemin puis cherche le premier canal WDM continu disponible sur ce chemin et l'affecte à la demande. Dans le cas multi-bande OFDM, lorsqu'une demande doit être établie entre deux nœuds du réseau, le simulateur calcule le plus court chemin puis cherche les premières sous-bandes continues disponibles permettant de satisfaire la demande. Ces sous-bandes peuvent être issues du même canal WDM ou de canaux WDM différents. C'est-à-dire, une demande nécessitant l'utilisation de deux sous-bandes en terme de capacité, peut être transportée par la sous-bande j du canal WDM i et la sous-bande k du canal WDM l sur le même chemin sélectionné. Les sous-bandes d'une même demande ne sont pas routées sur des chemins différents. C'est-à-dire les sous-bandes peuvent ne pas être contiguës sur le même chemin optique. Dans le cas mono-bande opaque, lorsqu'une demande doit être établie entre deux nœuds du réseau, le nœud source cherche sur le premier lien du chemin le premier canal WDM pouvant transporter la demande. Après à chaque passage dans un nœud, le trafic est converti en électrique et le nœud en question retransmet à son tour le trafic sur le premier canal WDM pouvant transporter la demande. Le canal WDM peut donc changer d'un lien du chemin à un autre.

iv. Topologie du réseau

Notre étude comparative des trois types d'architecture de réseaux optiques, décrites au chapitre II et III, utilise le réseau NSFnet (National Science Fundation Network). Ce type de réseau a été choisi car il est souvent utilisé dans des études similaires [50].

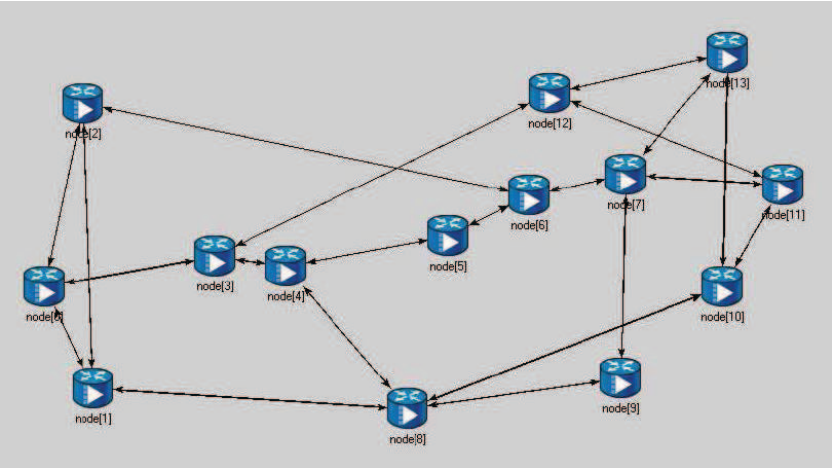


Figure IV-2 Réseau NSFnet

Il est constitué de 14 nœuds de connectivité moyenne égale à 3, reliés entre eux par 42 liens WDM comme cela est illustré dans la Figure IV-2.

Certaines simulations ont également été exécutées avec une topologie de réseau totalement différente, dans le but de valider le modèle de simulation et de confirmer les tendances observées sur une topologie totalement différente. Ceci permet aussi d'étudier l'impact de la variation de la topologie de caractéristiques différentes sur les résultats de simulation. La deuxième topologie retenue est une topologie de réseau métropolitain. Ces caractéristiques sont exposées dans le Tableau IV-1.

Taille du réseau	45 nœuds		59 liens
Longueur maximale entre deux nœuds			4 sauts
Volume du trafic			145 Gbit/s
Moyenne des débits des demandes			3,2 Gbit/s
	Moyenne	Minimum	Maximum
Degré moyen des	2,6	1	8

Tableau IV-1 caractéristique du réseau métropolitain

IV.3.2. Hypothèses sur le trafic inséré

Le trafic inséré dans le réseau simule le trafic provenant des couches clientes. Dans nos simulations, chaque nœud du réseau émet du trafic vers l'ensemble des autres nœuds du réseau. C'est à dire, si le réseau est constitué de *n* nœuds, alors chaque nœud émet du trafic vers les *(n-1)* autres nœuds du réseau. Dans chaque nœud, nous avons donc *(n-1)* flux

différents, soit un total de *n (n-1)* flux indépendants dans tout le réseau. Toutes les demandes ont la même probabilité d'apparition. Par conséquent, nous aurons, dans le cas du réseau NSFnet, 182 flux indépendants. Chaque demande est caractérisée par le triplet (Source, Destination, Débit). Au niveau de chaque nœud du réseau, le générateur de trafic émet des demandes vers n'importe quelle destination (sauf lui-même). Pour chaque demande, la destination est choisie aléatoirement selon une loi de probabilité uniforme, sa durée selon une loi exponentielle de moyenne y et avec une fréquence suivant une loi exponentielle de moyenne x.

La charge C produite par le générateur situé sur une source donnée pour une destination donnée est donc définie par :

$$C = \frac{x}{y}$$ **Équation IV-1**

Une fois la durée de la demande écoulée, les ressources du réseau sont libérées et peuvent être utilisées pour satisfaire une autre demande.

IV.4. Fonctionnement du modèle de simulation pour les différentes architectures étudiées

Le fonctionnement des modules simulant les nœuds est différent selon les architectures. L'objectif de ce paragraphe, est d'expliquer le fonctionnement du simulateur pour chaque architecture étudiée.

IV.4.1. Routage des demandes

Pour le routage des demandes, un algorithme simple basé sur la recherche du plus court chemin [51] a été choisi. Le plus court chemin est définit en termes de nœuds traversés et non en termes de distance kilométrique car les phénomènes de dégradation physique des signaux ne sont pas considérés dans ces simulations. Pour chaque type d'architecture la première étape effectuée par le simulateur est le calcul du plus court chemin.

IV.4.2. Fonctionnement du simulateur dans le cas de l'architecture mono-bande transparent

Dans le cas mono-bande transparent, les nœuds du réseau représentent des nœuds transparents chargés seulement d'aiguiller un canal WDM d'un port d'entrée vers un port de sortie. Comme expliqué dans la section IV.2 les liens d'interconnexion des différents nœuds représentent les fibres optiques. Ces dernières contiennent des canaux WDM. La

Figure IV-3 illustre la modélisation d'un lien d'un réseau mono-bande transparent. Le lien est représenté par un vecteur de *n* valeurs. Chaque valeur du vecteur représente l'état d'occupation de chaque canal WDM du lien en question.

Canaux WDM	λ_1	λ_2	λ_3	...	...	...	...	...	λ_n
Etat des ressources	0	1	1	1	0	1	1	0	0

Figure IV-3 Représentation de l'état des ressources d'un lien d'un réseau mono-bande transparent

Soit i l'indice du canal WDM sur le lien k. L'indice i est entre 1 et W, où W est le nombre maximal de canaux WDM par lien. L'indice k est entre 1 et T, où T est le nombre de liens dans le réseau. Dans le cas du réseau NSFnet T est à égale à 42. Nous notons L_i^k le vecteur représentant l'état des ressources du lien k du réseau.

$$\begin{cases} si\ L_i^k = 0\ alors\ le\ canal\ WDM\ i\ sur\ le\ lien\ k\ \ est\ libre \\ si\ L_i^k = 1\ alors\ le\ canal\ WDM\ i\ sur\ le\ lien\ k\ est\ occupée \end{cases}$$

Par exemple, dans le cas de la

Figure IV-3 le canal WDM transporté par la longueur d'onde 1 est libre alors que le canal WDM transporté par la longueur d'onde 2 est occupé sur le lien en question. Dans les simulations, les différents modules (les nœuds) sont en charge de la génération du trafic, du calcul des routes et de sa réception une fois arrivée à destination.

La

Figure IV-4 schématise les différentes étapes qu'effectue chaque nœud lorsqu'une demande doit être établie dans le cas des réseaux mono-bandes transparents.

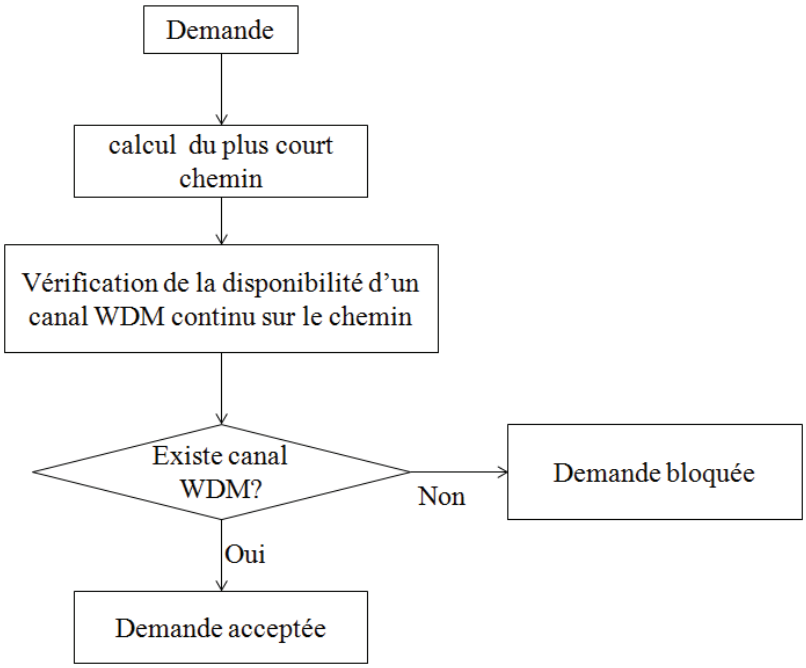


Figure IV-4 Algorithme utilisé pour l'admission des connexions dans le réseau mono-bande transparent demande

Le nœud source calcule d'abord le plus court chemin permettant de transporter la demande. Dans le cas mono-bande transparent, les conversions optoélectroniques sont interdites dans chaque nœud intermédiaire. Chaque demande est donc transportée par un seul canal WDM. Le simulateur cherche par la suite, un canal WDM continu sur tout le chemin optique. Pour ce faire, le vecteur représentant l'état des ressources (dans le cas mono-bandes transparents les ressources représentent les canaux WDM) sur l'ensemble du chemin optique est calculé. Ce vecteur noté R_i est la somme des vecteurs L_i^k sur le chemin calculé:

$$C = plus_court_chemin(Source, Destination)$$

$$R_i = \sum_{k\ dans\ C} L_i^k \qquad \textbf{Équation IV-2}$$

Où La fonction plus_court_chemin(Source, Destination) retourne l'ensemble C des liens constituants le plus court chemin entre une source et une destination.

S'il existe *i* tel que $R_i = 0$ alors la demande est acceptée si non la demande est bloquée. Le simulateur cherche les longueurs d'ondes disponibles seulement sur le premier plus court chemin. Ce choix est le même pour les différentes architectures étudiées.

IV.4.3. Fonctionnement du modèle de simulation pour le cas mono-bande opaque

Dans le cas mono-bande opaque, les conversions optoélectroniques sont systématiques à chaque passage dans un nœud sur le chemin de la source vers la destination. Par conséquent, le canal WDM transportant une demande peut changer d'un lien à un autre. De ce fait, la contrainte de continuité n'existe pas. Pour savoir si une demande peut être transportée, il suffit de vérifier, après la sélection du plus court chemin, la disponibilité des ressources nécessaires sur chaque lien du chemin. La

Figure IV-5 illustre la modélisation d'un lien d'un réseau mono-bande opaque. Nous notons L_i^k le vecteur représentant l'état des ressources du lien k du réseau. Les valeurs de L_i^k représentent l'occupation en Gbit de chaque canal WDM i du lien k. Dans l'architecture mono-bande opaque, l'occupation des canaux WDM est représentée en Gbit et non en binaire comme dans le cas mono-bande transparent, car un canal WDM peut transporter plusieurs demandes agrégées à la condition que la somme des demandes agrégées soit inférieure à la capacité maximal du canal WDM, à savoir 100 Gbit.

λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	...	....	...	...	λ_n
20Gbit	30Gbit	100Gbit	100Gbi	100Gbit	0Gbit	0Gbit	50Gbit	30Gbit

Figure IV-5 Représentation de l'état des ressources d'un lien d'un réseau mono-band opaque

La Figure IV-6 illustre l'algorithme utilisé pour l'admission des ressources dans le cas des réseaux mono-bandes opaques. Lorsqu'une demande doit être établie, Le nœud source calcule d'abord le plus court chemin permettant de transporter la demande. Dans le cas mono-bande opaque, les conversions optoélectroniques sont systématiques dans chaque nœud intermédiaire et une longueur d'onde sur un lien donné peut transporter plusieurs demandes.

La vérification de la disponibilité des ressources consiste donc à chercher sur chaque lien du chemin choisi un ou une partie d'un canal WDM pouvant satisfaire la demande. S'il existe des ressources disponibles alors la demande est acceptée si non la demande est bloquée. Soit D le débit d'une demande :

$$\begin{cases} si\ pour\ tout\ k\ appartenant\ \text{à}\ Ch\ il\ existe\ i\ tels\ que\ \ L_i^k \geq D\ alors\ la\ demande\ est\ acceptée \\ si\ non\ la\ demande\ est\ bloquée \end{cases}$$

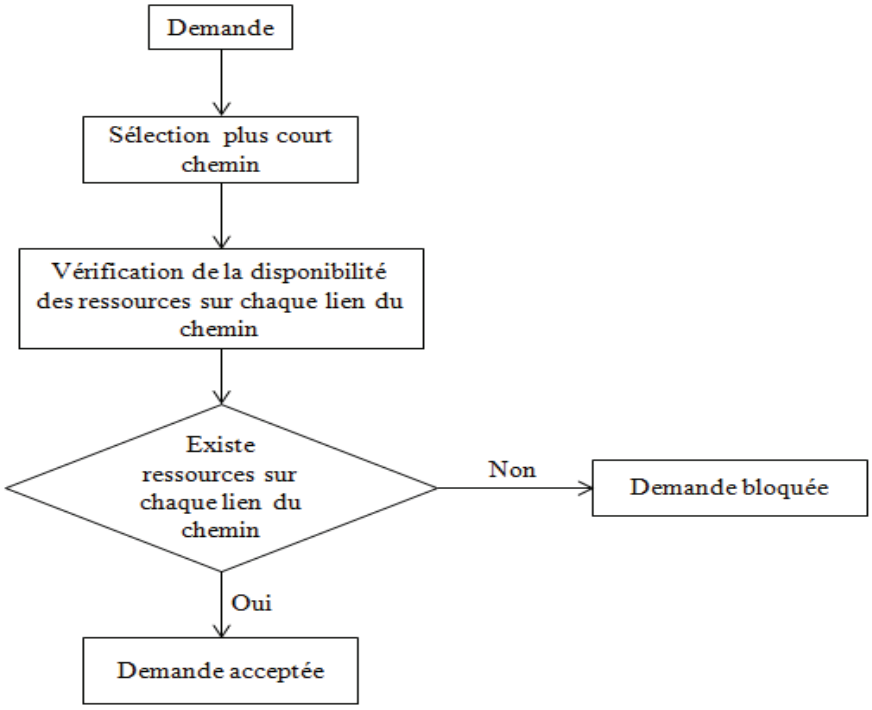


Figure IV-6 Algorithme utilisé pour l'admission des connexions dans le réseau mono-bande opaque

IV.4.4. Fonctionnement du modèle de simulation pour le cas multi-bande OFDM optique

i. Algorithme de fonctionnement

Dans le cas multi-bandes OFDM optique, les liens d'interconnexion des nœuds contiennent des canaux WDM et chaque canal WDM est composé de sous-bandes. Ces liens servent à véhiculer les demandes sur le réseau. Le **Tableau IV-2** illustre la modélisation d'un

lien multi-bande OFDM. Dans cette figure les canaux WDM sont composés de 4 sous-bandes (b1, b2, b3 et b4). Nous notons $\mathbf{L_{i,j}^{k}}$ cette matrice.

	λ_1	λ_2							λ_n
b_1	0	1	1	1	0	1	1	0	0
b_2	1	0	0	0	0	0	1	1	1
b_3	1	1	1	1	1	1	0	1	1
b_4	0	0	1	1	0	0	1	0	1

Tableau IV-2 Représentation de l'état des ressources d'un lien d'un réseau multi-bande OFDM

Les différentes cases de la matrice représentent l'état des sous-bandes des canaux WDM sur un lien k donné :

$$\begin{cases} si\ L_{i,j}^{k} = 0\ alors\ la\ sous-bande\ i\ de\ la\ longueur\ d'ondej\ est\ libre\ sur\ le\ lien\ k \\ si\ L_{i,j}^{k} = 1\ alors\ la\ sous-bande\ i\ de\ la\ longueur\ d'ondej\ est\ occupée\ sur\ le\ ien\ k \end{cases}$$

La case verte représente l'état de la sous-bande $b_{1,1}$. C'est la première sous-bande du canal WDM transporté par la longueur d'onde λ_1. Ici, cette sous-bande est libre et peut être utilisée pour transporter une demande. La case rouge représente l'état de la sous-bande $b_{1,2}$. C'est la première sous-bande du canal WDM transporté par la longueur d'onde λ_2. Dans ce cas, la sous-bande est occupée et ne peut être utilisée pour transporter une autre demande. La Figure IV-7 schématise les différentes étapes qu'effectue le simulateur lorsqu'une demande doit être établie dans le cas des réseaux multi-bandes OFDM. Chaque nœud du réseau dispose d'un générateur de demandes.

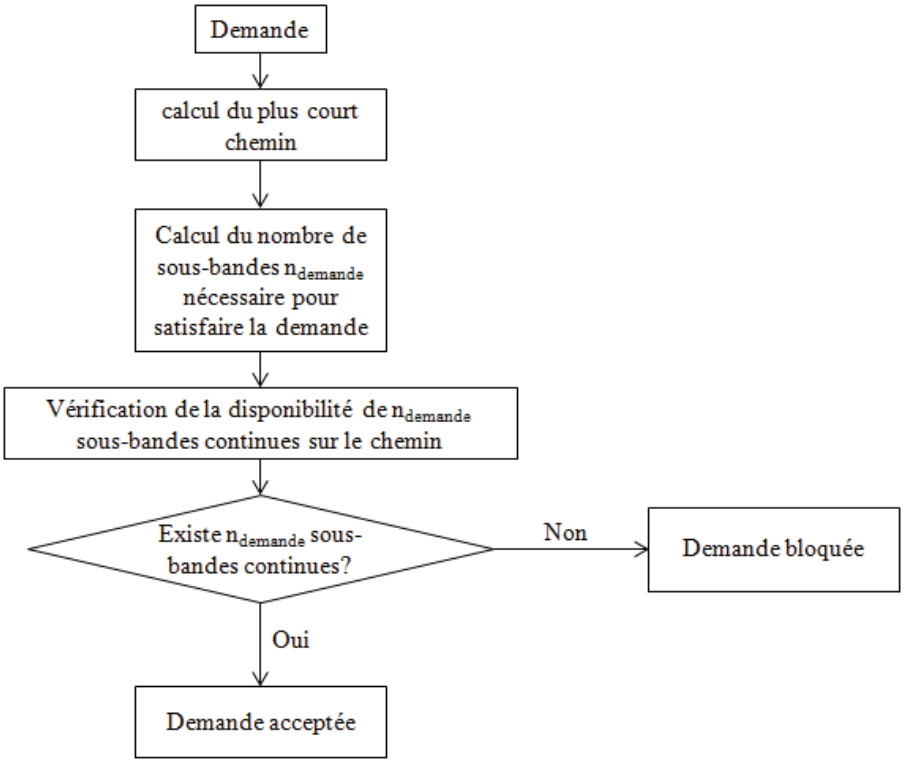


Figure IV-7 Algorithme utilisé pour l'admission des connexions dans le réseau multi-bande OFDM

Lorsqu'une demande est générée, le nœud calcule d'abord le plus court chemin que doit emprunter la connexion optique associée à cette demande. Par la suite, le nœud calcule le nombre de sous-bandes nécessaires pour transporter la demande. La phase suivante est la phase de sélection des sous-bandes. Elle se fait de la manière suivante :

- Le chemin que va emprunter la demande étant déterminé, le simulateur calcule la matrice $R_{i,j}$ représentant l'état de l'ensemble des ressources sur tout le chemin optique. $R_{i,j}$ est la somme des matrices $L_{i,j}^{k}$ représentant l'état des ressources (sous-bande i, longueur d'onde j) sur le lien k. Nous avons par définition :

$$Ch = plus_court_chemin(Source, Destination)$$

$$R_{i,j} = \sum_{k\ appartenant\ \grave{a}\ Ch}^{K} L_{i,j}^{k}$$

Équation IV-3

- C représente l'ensemble des liens constituant le plus court chemin entre une source et une destination. Ainsi la matrice $R_{i,j}$ nous renseigne sur l'ensemble des ressources disponibles et continues de bout en bout pour une demande donnée.

$$\begin{cases} si\ R_{i,j} = 0\ alors\ la\ sous-bande\ i\ de\ la\ longueur\ d'onde\ j\ est\ continue\ et\ disponible\ sur\ tout\ le\ chemin \\ si\ R_{i,j} > 0 alors\ la\ sous-bande\ i\ de\ la\ longueur\ d'onde\ j\ est\ occupée\ sur\ au\ moins\ un\ tronçon\ du\ chemin \end{cases}$$

- Dans la matrice $R_{i,j}$ le simulateur cherche les premières (first-fit) sous-bandes disponibles permettant de répondre à la demande sur l'ensemble des liens formant le chemin. S'il existe des sous-bandes disponibles alors elles sont réservées sur tous les liens du chemin et la demande est acceptée, sinon la demande est bloquée. Dans le cas où la demande nécessite plusieurs sous-bandes, ces dernières ne doivent pas être nécessairement contigües. Par exemple, une demande nécessitant deux sous-bandes, peut utiliser des sous-bandes de deux canaux WDM différents sur le même chemin sélectionné.

ii. Exemple de fonctionnement du simulateur

Cette section expose deux exemples de fonctionnement du simulateur dans le cas multi-bande OFDM: le premier représentant le cas d'une demande acceptée et le second représentant le cas d'une demande bloquée. L'exemple de fonctionnement est appliqué sur une partie d'un réseau de télécommunication optique caractérisée par trois nœuds et deux liens, comme cela est illustré dans la Figure IV-8.

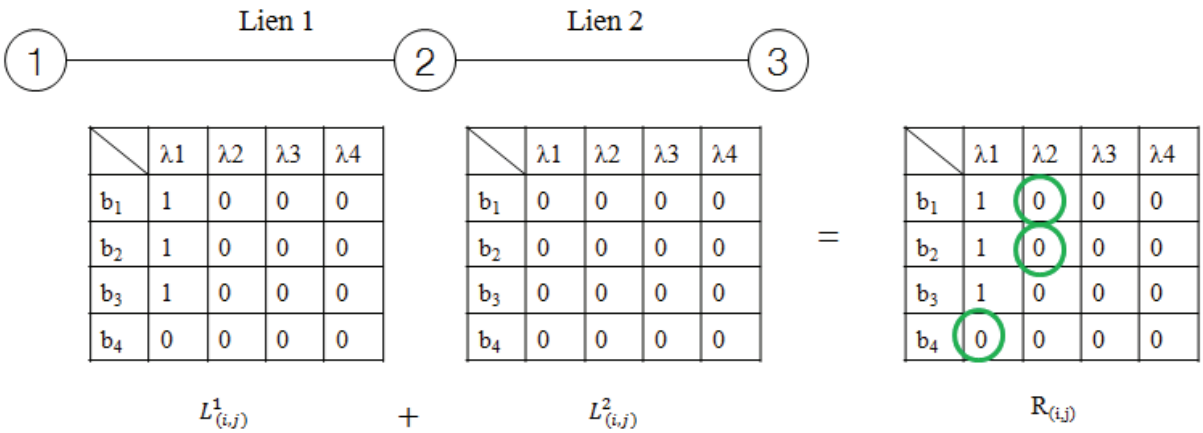
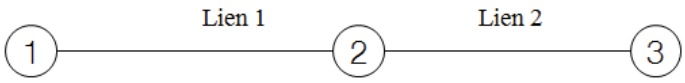


Figure IV-8 Phase de sélection des sous-bandes dans le cas multi-bande OFDM : cas d'une demande acceptée

Les matrices $L^1_{(i,j)}$ et $L^2_{(i,j)}$ (sous-bande i, longueur d'onde j) représentent l'état de chaque lien (lien 1 et lien 2) en terme de disponibilité de ressources à un instant donné (le lien entre les nœuds 1 et 2 et le lien entre les nœuds 2 et 3). La matrice $R_{(i,j)}$ représente l'état des ressources sur tout le chemin optique. La demande à établir dans notre exemple est une demande du nœud 1 vers le nœud 3 et qui requiert 3 sous-bandes. Le simulateur calcule d'abord le plus court chemin entre le nœud 1et le nœud 3. Ici le chemin entre le nœud 1 et le nœud 3 passe par le nœud 2. Nous représentons donc seulement cette portion du réseau qui nous intéresse.

Par la suite le simulateur calcule la matrice $R_{i,j}$. La matrice $R_{i,j}$ permet de trouver les trois premières sous-bandes disponibles et continues sur tout le chemin optique ($R_{i,j}$=0). Dans notre cas, la connexion associée à la demande va être supportée par les 3 sous-bandes encerclées en vert : $b_{4,1}$ (sous-bande 4 du canal WDM 1), $b_{1,2}$ (sous-bande 1 du canal WDM 2) et $b_{2,2}$ (sous-bande 2 du canal WDM 2). Comme nous pouvons le remarquer dans cet exemple, les sous-bandes qui transportent la demande entre le nœud 1 et le nœud 3 sont contigües mais n'appartiennent pas nécessairement à la même longueur d'onde. Si les deux premières sous-bandes du canal WDM transporté par la longueur d'onde 2 étaient occupées ($R_{i,j}$=1), l'algorithme aurait sélectionné les deux autres sous-bande de ce même canal. Dans cette étude de performance il n'y a pas de contrainte de contigüité.

Considérons maintenant l'état des matrices $L^1_{i,j}$ et $L^2_{i,j}$ de l'exemple de la Figure IV-9. Considérons aussi la même demande du nœud 1 vers le nœud 3 et qui nécessite 3 sous-bandes.



	λ1	λ2	λ3	λ4
b_1	1	0	0	0
b_2	1	0	0	0
b_3	1	0	0	0
b_4	0	0	0	0

$L^1_{(i,j)}$

+

	λ1	λ2	λ3	λ4
b_1	0	1	1	1
b_2	0	1	1	1
b_3	0	1	1	1
b_4	0	1	1	1

$L^2_{(i,j)}$

=

	λ1	λ2	λ3	λ4
b_1	1	1	1	1
b_2	1	1	1	1
b_3	1	1	1	1
b_4	0	1	1	1

$R_{(i,j)}$

Figure IV-9 Phase de sélection des sous-bandes dans le cas multi-bande OFDM : cas d'une demande bloquée

Dans la matrice $R_{(i,j)}$ il n'y a qu'une seul case égale à 0. Cette case correspond à la sous-bande 4 du canal WDM transporté par la longueur d'onde 1. C'est la seule sous-bande continue sur tout le chemin que va remprunter la demande. Ceci veut dire qu'il n'existe pas de sous-bandes continues pouvant transporter la demande en question, alors même que sur chacun des liens L_1 et L_2 considérés séparément elles existent en nombre suffisants: ces sous-bandes ne satisfont pas la contrainte de continuité. Une manière de contourner ces limites est d'accepter de router la demande par partie en utilisant les multi-chemins. C'est-à-dire utiliser la sous-bande disponible pour transporter une partie de la demande sur le premier chemin choisi et répartir le reste de la demande sur deux autres sous-bandes disponibles sur un ou deux autres chemins déterminés à partir du calcul des n autres plus courts chemin restant jusqu'à écoulement totale de la demande. Cette piste n'a pas été approfondie dans nos études.

IV.5. Résultat de simulations

Nous présentons dans cette section les résultats de notre étude de simulation. Les trois types d'architecture de réseaux optiques (mono-bande opaque, mono-bande transparent et multi-bandes OFDM) sont évalués en termes de probabilité de blocage. Pour chaque architecture le taux de blocage est calculé. Soit $D_{générées}$ le nombre de demandes générées par le simulateur et $D_{bloquées}$ le nombre de demandes qui ont été bloquées. Le taux de blocage est donné par le ratio :

$$Taux\ de\ blocage = \frac{D_{bloquées}}{D_{générées}}$$

Le

Tableau IV-3 synthétise les paramètres utilisé pour les simulations des trois architectures utilisées. Nous étudions par la suite l'impact de la variation de certains de ces paramètres (par exemple le nombre de sous-bandes par canal WDM) ainsi que l'impact de l'intégration de la fonctionnalité de la conversion de la longueur d'onde sur les performances des trois différents types d'architecture de réseaux optiques. Dans ces simulations, aucun dimensionnement particulier n'est considéré pour les équipements installés dans les nœuds (transpondeurs,

commutateur optique, nombre de ports par commutateur). Le nombre de ressources dans les nœuds est illimité. Seul le nombre de longueur d'onde par fibre est limité.

Nombres de nœuds	14
Nombres de liens	42
Degré moyenne des nœuds	3.3
Nombre de flux de trafic	182
Débit des demandes	[1 Gbit/s, 100Gbit/s]
Nombre de longueur d'onde	10
Espacement entre longueur d'onde	50 GHz
Nombre de sous-bandes	4
Débit par sous-bande	25 Gbit/s

Tableau IV-3 Synthèse des paramètres utilisés pour les simulations

Dans le chapitre suivant, nous présenterons une étude de dimensionnement déterminant le nombre d'équipements à déployer. Ici, nous nous intéressons uniquement au nombre de demandes que peut satisfaire un type d'architecture par rapport à un autre en considérant la même topologie, le même trafic et le même nombre de canaux WDM maximum par fibre. Ces simulations nous permettent de comparer l'efficacité de chaque scénario en fonction du degré de flexibilité qu'ils offrent. Pour ce faire, nous mesurons leur capacité à accepter du trafic (mesure du taux de blocage). L'idée est d'injecter un nombre important de demandes et de voir le comportement des trois différents types d'architectures. Pour chaque architecture 200000 demandes sont générées. A partir de ce nombre de demandes le taux de blocage ne varie plus pour chaque type d'architecture et pour n'importe qu'elle valeur de la charge C.

IV.5.1. Considération physique pour le choix du nombre de sous-bandes pour l'architecture multi-bande OFDM

Concernant l'architecture multi-bande OFDM, nous considérons un espacement entre canaux WDM de 50 GHz, conformément au plan de fréquence défini par la recommandation ITU-T G.694.2. A ces 50 GHz, il faut soustraire une bande de garde de l'ordre de 5 GHz de part et d'autre afin de tenir compte de la bande passante réelle des filtres optiques utilisés notamment pour le brassage des différent canaux WDM. Par conséquent, la bande passante

utile disponible pour mettre les sous-bandes est de 40 GHz. Afin de déterminer le nombre de sous-bandes par canal WDM, il faut prendre en considération un certain nombre de paramètres : la largeur spectrale des sous-bandes, le débit des sous-bandes, la bande passante des filtres ainsi que l'espacement entre sous-bandes. Dans un premier temps nous supposons qu'un canal multi-bandes OFDM optique est constitué de quatre sous-bandes indépendantes. Cette découpe en 4 sous-bandes correspond à ce qui est faisable aujourd'hui [52]. Nous considérons qu'un canal WDM peut transporter un débit maximal de 100 Gbit/s. par conséquent, chaque sous-bande peut transporter un débit de 25 Gbit/s. Ce débit maximal est atteint quand toutes les sous-bandes d'un canal WDM sont utilisées. Une étude approfondie sur le nombre de sous-bandes par canal WDM et sur la manière de les faire varier sera faite à la fin de ce chapitre.

IV.5.2. Multi-bande OFDM optique versus mono-bande opaque et mono-bande transparent

Dans cette section nous présentons les résultats de simulation permettant de comparer les trois types d'architecture optique. L'idée est de calculer pour chaque architecture le taux de blocage en fonction de la charge des générateurs de trafic. Nous rappelons que la charge est définie par le rapport $\frac{x}{y}$. Dans le but d'assurer la fiabilité des résultats, nous vérifions que l'intervalle de confiance [53] est suffisamment petit pour que les résultats fournis par le modèle de simulation soit stable. Pour ce faire, nous effectuons 50 simulations avec les mêmes paramètres mais avec différents tirages aléatoires des demandes.

La Figure IV-10 illustre le taux de blocage en fonction de la charge C offerte par les générateurs pour les trois types d'architecture. Nous constatons que pour les trois architectures, le taux de blocage augmente avec la charge C. Dans le cas mono-bande transparent, la situation de blocage est atteinte plus rapidement (à partir de C=0,15) que dans le cas mono-bande opaque et multi-bande OFDM où le blocage est atteint à partir de C=0,3. D'autre part, Le taux de blocage est toujours plus important dans le cas mono-bande transparent que dans le cas multi-bande OFDM et mono-bande opaque. Cela est dû au fait que dans le cas mono-bande transparent, à chaque demande, un canal WDM entier est attribué quel que soit le débit demandé, alors que dans le cas multi-bande OFDM et mono-bande

opaque, un canal WDM peut être partagé par plusieurs demandes. Les réseaux opaques sont donc plus performants en termes de taux de blocage. En effet, dans ce type de réseaux nous avons d'un côté accès à des granularités plus fines (nous supposons que la granularité la plus fine dans le cas mono-bande opaque est de l'ordre de 1 Gbit/s) que dans les réseaux mono-bandes transparents et multi-bandes OFDM, et d'un autre coté nous n'avons pas de contrainte de continuité contrairement aux réseaux mono-bandes transparents et multi-bandes OFDM.

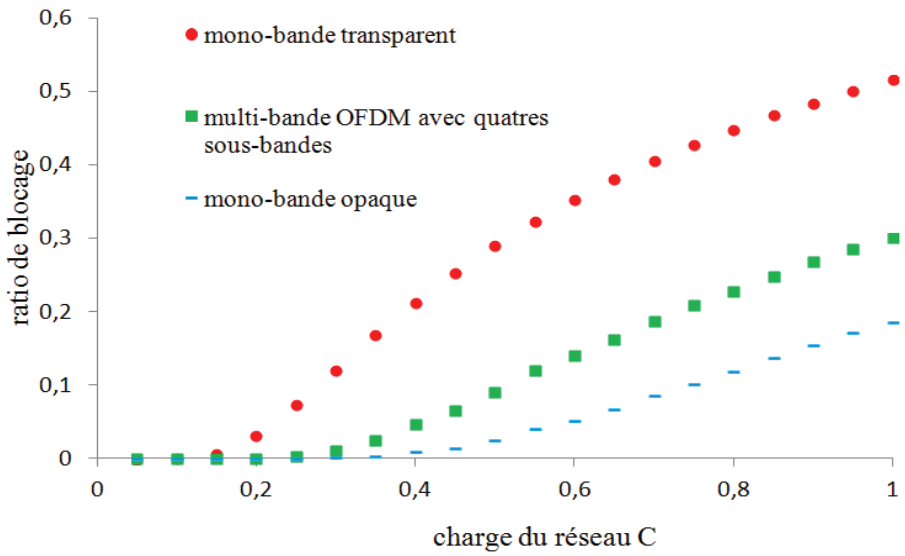


Figure IV-10 taux de blocage pour les scenarios mono-bande transparent, mono-bande opaque et mono-bande transparent en fonction de la charge offerte par le générateur pour le réseau NSFnet

Afin de bien expliquer le comportement des trois types d'architecture de réseaux optiques vis-à-vis des demandes à établir, considérons l'exemple de Figure IV-11 qui représente une topologie à 4 nœuds.

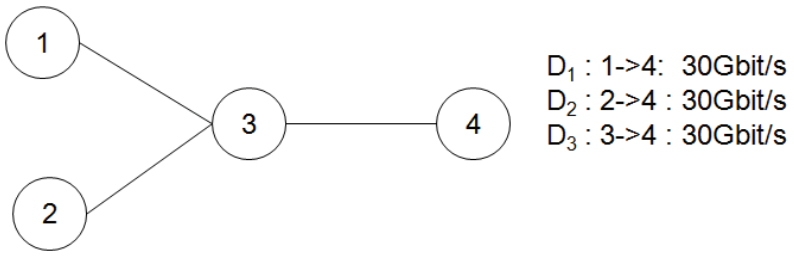


Figure IV-11 Topologie et trafic d'un exemple de réseau à 4 nœuds

Dans cet exemple, nous avons trois demandes D1, D2 et D3. Chaque demande nécessite 30 Gbit/s en débit. Nous supposons que sur chaque lien 1-3, 2-3, 3-4 le seul canal WDM disponible est celui porté par longueur d'onde λ_1.

Cas mono-bande opaque : L'architecture mono-bande opaque a recourt à des conversions optoélectroniques dans chaque nœud, les trois flux issus de chaque demande vont donc être agrégés dans le nœud 3 et transportés sur un même canal WDM vers le nœud 4. Dans ce cas aucune demande ne sera bloquée.

Cas multi-bande OFDM : Le canal WDM disponible sur les différents liens du réseau est composé de 4 sous-bandes dont le débit de chacune est de 25 Gbit/s. Chaque demande a besoin de 30 Gbit/s, et requière donc 2 sous-bandes indépendantes pour être transportée sur le réseau. Le canal WDM 1 ne pourra transporter que 2 demandes, la troisième étant donc bloquée.

Cas mono-bande transparent : dans ce cas, chaque demande nécessite un canal WDM. Une seule demande peut donc être établie étant donné qu'un seul canal WDM n'est disponible sur chaque lien.

Ces premiers résultats de simulation nous ont aidés à situer l'approche multi-bande OFDM par rapport aux approches mono-bande opaque et mono-bande transparent. Le blocage dans les réseaux optiques transparent peut être dû à:

- Un défaut de faisabilité physique : le chemin que doit emprunter une demande n'assure pas la qualité de transmission requise par celle-ci, dans ce cas des régénérations seront indispensables et la transparence n'est pas assurée. Dans notre étude ce phénomène n'est pas pris en compte car nous ne nous sommes pas intéressés à la dégradation physique des signaux sur un chemin donné.

- la contrainte de continuité : il existe des ressources (canaux WDM et/ou sous-bandes) sur les différents liens du chemin que va emprunter la demande, mais ces ressources ne sont pas continues.
- l'absence de ressources nécessaires pour transporter le trafic : il n'existe pas de ressources suffisantes sur au moins un lien du chemin que va emprunter la demande. Par ressources, nous voulons dire sous-bandes ou canaux WDM, les équipements installés dans les nœuds sont considérés sans limite.

Dans nos simulations, le blocage est donc dû à la contrainte de continuité et à l'absence de ressources pour transporter les demandes dans les réseaux mono-bandes transparents et multi-bandes OFDM. Dans la Figure IV-12 nous avons séparé ces sources de blocage dans les réseaux multi-bandes OFDM.

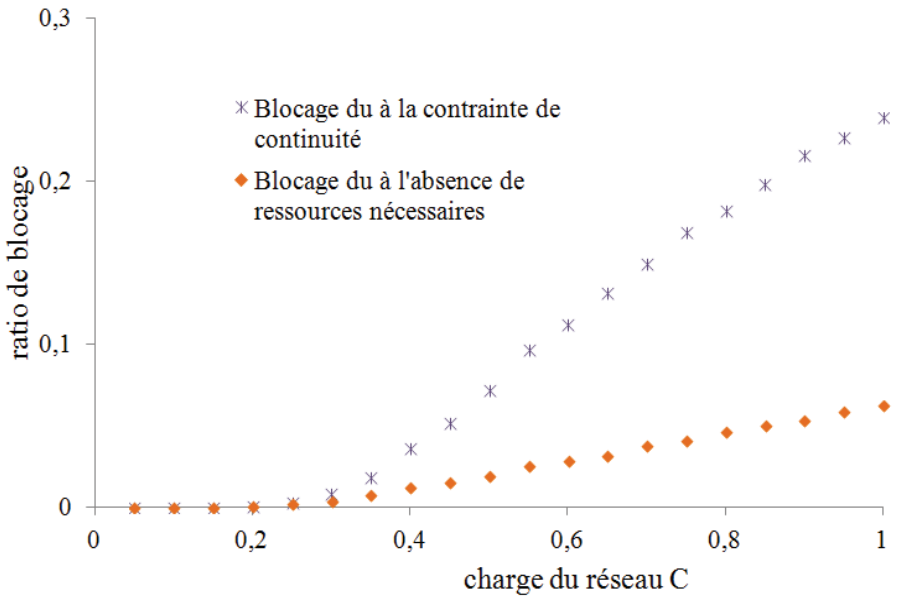


Figure IV-12 Sources de blocage dans les réseaux multi-bandes OFDM

Nous remarquons que le blocage est principalement dû à la contrainte de continuité. Dans ce contexte, déployer de la conversion de longueur d'onde ou de sous-bandes pourrait réduire le taux de blocage dans les réseaux multi-bandes OFDM optiques. Dans la section suivante nous allons étudier l'impact du déploiement de ces convertisseurs de longueur d'onde/sous-bandes sur notre réseau multi-bandes OFDM.

IV.5.3. Impact du déploiement des convertisseurs de longueur d'onde/sous-bandes dans les réseaux multi-bandes OFDM optiques

Comme expliqué précédemment, la contrainte de continuité oblige une demande à occuper des ressources optiques continues de bout en bout sur chaque lien du chemin optique emprunté. Elle peut donc entraîner le rejet d'une demande même si la capacité requise est disponible sur tous les liens indépendamment mais pas sur des ressources optiques continues, c'est-à-dire ayant la même longueur d'onde de bout en bout. Un convertisseur de longueur d'onde permet de convertir un signal d'une longueur d'onde à une autre. Placer dans les nœuds du réseau où apparait un problème de continuité, il peut donc le résoudre. Nous distinguons trois mécanismes de conversion de longueur d'onde [13] [54] :

- *Fixed-wavelengtht conversion* : chaque longueur d'onde d'entrée est associée à une seule longueur d'onde de sortie prédéterminée par l'architecture du convertisseur.
- *Limited-wavelength conversion* : une longueur d'onde d'entrée peut être convertie vers un ensemble de longueur d'onde bien définit.
- *Full-wavelength conversion* : une longueur d'onde d'entrée peut être convertie vers n'importe qu'elle autre longueur d'onde en sortie.

Il existe deux manières de faire de la conversion de longueurs d'onde dans le cas de Full-Wavelength conversion. La première est basée sur des conversions optoélectroniques. Le signal optique est d'abord converti dans le domaine électrique. Par la suite, le signal électrique est commuté, puis il est injecté dans un émetteur basé sur un laser accordable réglé sur la longueur d'onde de sortie. Cette solution nécessite des conversions optoélectroniques et par conséquent engendre un coût supplémentaire. La seconde est la conversion de longueur d'onde tout-optique. Plusieurs prototypes ont été conçus dans les laboratoires de recherche [55], néanmoins cette solution demeure encore immature.

Dans nos études nous considérons un mécanisme de conversion de longueur d'onde full-wavelength tout optique car c'est le mécanisme le plus flexible. Nous supposons aussi que le

convertisseur de longueur d'onde utilisé dispose aussi d'une fonction permettant de convertir une sous-bande d'une position spectrale à une autre dans le même canal WDM.

Considérons l'exemple de la Figure IV-13 afin d'expliquer l'intérêt de la conversion de longueur d'onde/sous-bandes. Il existe deux connexions en cours, une du nœud 1 vers le nœud 2 utilisant le canal WDM λ_1 (D_1), l'autre du nœud 2 vers le nœud 3 utilisant le canal WDM λ_2 (D_2).

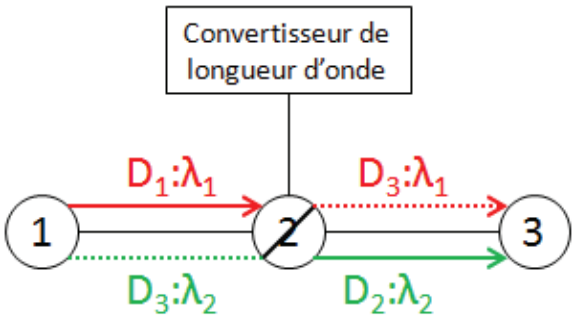


Figure IV-13 Exemple de conversion de longueur d'onde dans un réseau optique composé de 3 nœuds

Une demande du nœud 1 vers le nœud 3 (D_3) va utiliser la longueur d'onde λ_2 sur le lien 1-2, puis grâce au convertisseur installé dans le nœud 2, elle sera transportée par la longueur d'onde λ_1 sur le tronçon 2-3. Notre convertisseur est utilisé ici en tant que convertisseur de longueurs d'onde.

La Figure IV-14 illustre un exemple de conversion de sous-bandes. Dans cet exemple nous avons deux demandes en cours utilisant chacune 2 sous-bandes: la demande D_1 du nœud 1 vers le nœud 2 véhiculée par les sous-bandes $b_{1,1}$ et $b_{2,1}$ et la demande D_2 du nœud 2 vers le nœud 3 transportée par les sous-bandes $b_{3,1}$ et $b_{4,1}$. Sur chacun des liens 1-2 et 2-3, il reste donc deux sous-bandes disponibles :

- $b_{3,1}$ et $b_{4,1}$ sur le lien 1-2
- $b_{1,1}$ et $b_{2,1}$ sur le lien 2-3

Considérons maintenant une demande supplémentaire D_3 utilisant également 2 sous-bandes. Il n'existe pas 2 sous-bandes continues pour transporter cette demande à cause d'un problème de continuité au niveau du nœud 2. Considérons maintenant un système de conversion de

sous-bandes dans le nœud 2. Dans ce cas-là, la demande D_3 va pouvoir être transportée sur le lien 1-2 par les sous-bandes $b_{3,1}$ et $b_{4,1}$, être convertie vers les sous-bandes $b_{1,1}$ et $b_{2,1}$ grâce au convertisseur de sous-bandes dans le nœud 2 puis transmis sur le lien 2-3. Le convertisseur est utilisé ici comme convertisseur de sous-bandes à l'intérieur d'un même canal WDM.

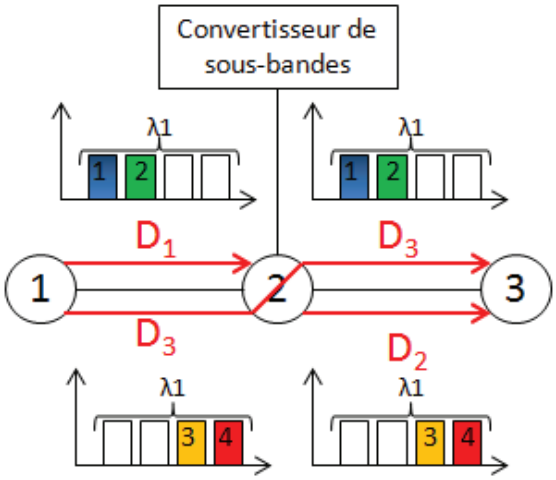


Figure IV-14 Exemple de conversion de sous-bandes dans les réseaux multi-bandes OFDM

Pour voir l'impact de la conversion de longueur d'onde/sous-bandes sur les réseaux multi-bandes OFDM optiques, le comportement du simulateur a été adapté au moment de la phase d'affectation des ressources. Lorsqu'une demande doit être établie, le simulateur détermine d'abord le chemin que doit emprunter la connexion associée à cette demande, puis il cherche sur chaque lien du chemin, les sous-bandes disponibles permettant de transporter cette demande. Par exemple, pour une demande de 50 Gbit/s le simulateur cherche sur chaque lien du chemin optique deux sous-bandes disponibles (peu importe la position spectrale des sous-bandes sur chaque lien).

La Figure IV-15 illustre l'impact de déploiement des convertisseurs sur les performances du réseau multi-bande OFDM. Nous remarquons que l'impact du déploiement des convertisseurs de longueurs d'onde/sous-bande est relativement faible. Le taux de blocage des réseaux multi-bandes OFDM a été réduit de 16% en moyenne. Ceci est dû au fait que le déploiement des convertisseurs favorise maintenant les demandes qui font plus de 1 saut au détriment des demandes à 1 saut. Dans le cas où il n'y a pas de conversion, les demandes bloquées sont principalement des demandes à plusieurs sauts ; En effet le risque de problème de continuité

augmente avec le nombre de sauts. Dans le cas où les convertisseurs sont déployés la contrainte de continuité est réduite et les demandes qui ont plus qu'1 saut sont favorisées.

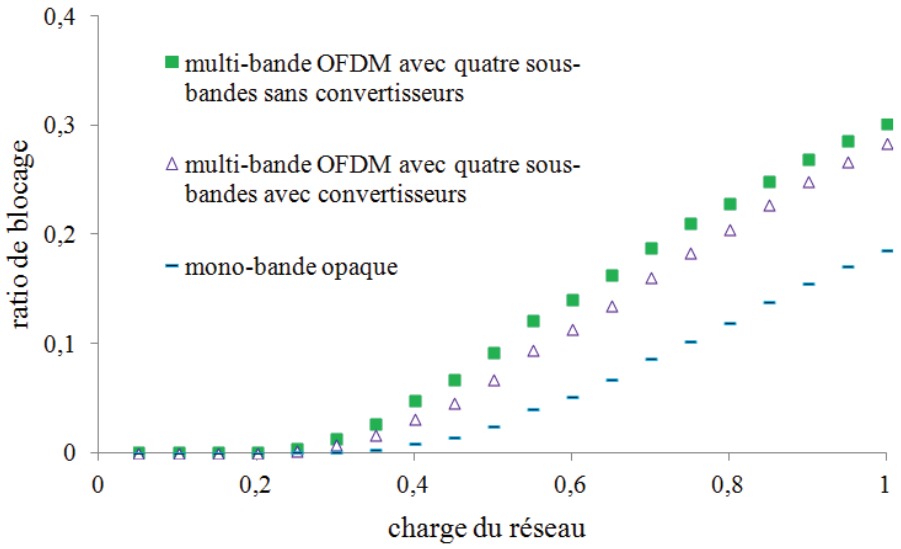


Figure IV-15 Impact du déploiement des convertisseurs sur les performances des réseaux multi-bandes OFDM

Afin d'appuyer cette constatation, nous avons tracé dans la Figure IV-16 les demandes acceptées qui font 3 sauts dans le cas avec conversion et sans conversion.

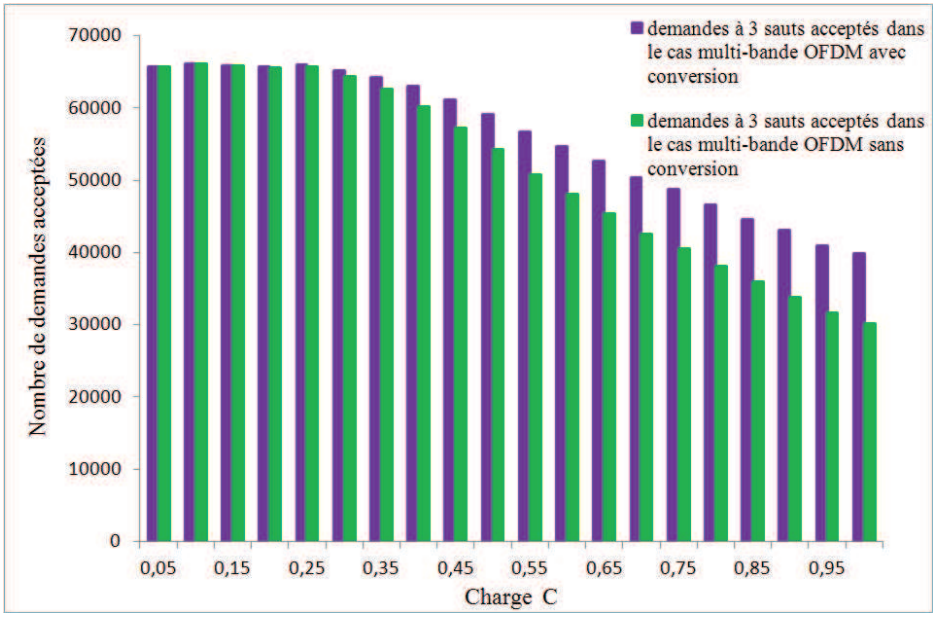


Figure IV-16 Nombres de demandes à 3 sauts acceptées dans le cas multi-bande OFDM avec conversion et sans conversion et avec 4 sous-bandes

Nous remarquons, que dans le cas où la conversion est utilisée, nous avons plus de demandes à 3 sauts acceptées. Donc en pratique, plus de liens sont occupés et le nombre de ressources disponibles diminue. Par conséquent nous avons moins de demandes à 1 saut acceptées.

La Figure IV-17 illustre le nombre de demande à 1 saut pour le cas multi-bande OFDM avec conversion et pour le cas multi-bande OFDM sans conversion en fonction de la charge C.

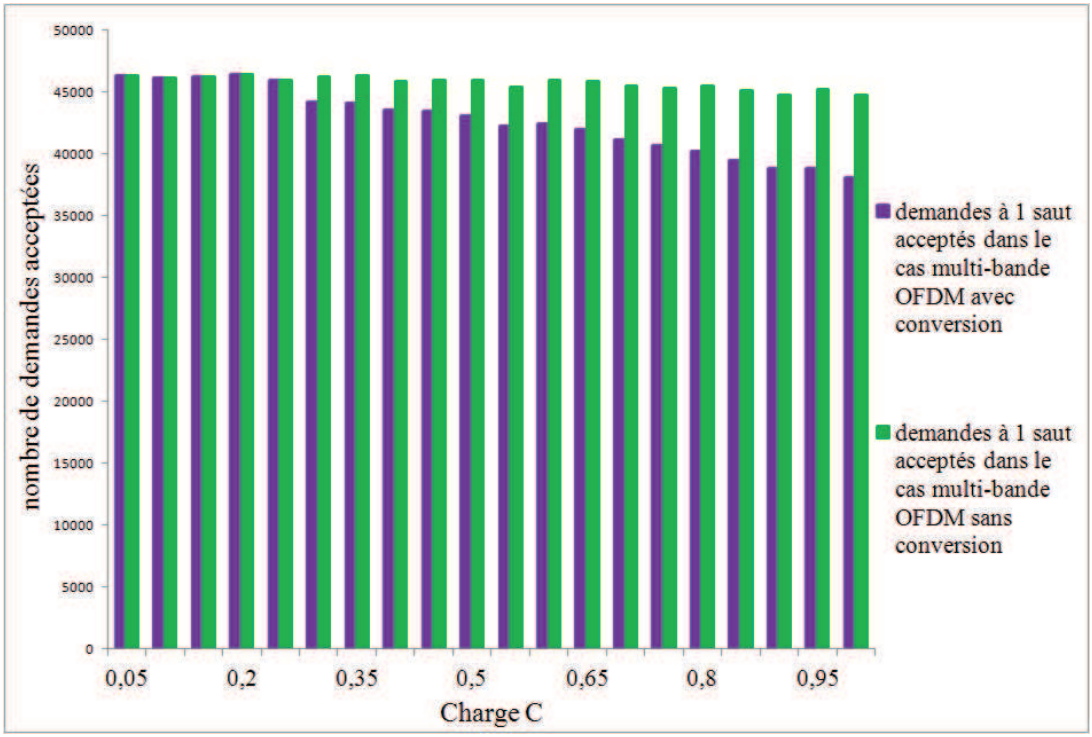


Figure IV-17 Nombres de demandes à 1 saut accepté dans le cas multi-bande OFDM avec conversion et sans conversion et avec 4 sous-bandes

Le cas multi-bande OFDM avec conversion satisfait moins de demandes à 1 saut que le cas multi-bande OFDM sans conversion. En résumé, le nombre de demandes à 3 sauts augmente dans le cas où la conversion est déployée mais pas dans les mêmes proportions que les demandes à un saut diminuent : donc au total le gain ou les pertes dues aux convertisseurs dépend de la répartition des 1 sauts et 3 sauts.

IV.5.4. Impact de la variation de nombre de sous-bandes

Les réseaux mono-bandes opaques sont toujours les plus performants en termes de blocage. Ceci est dû principalement au fait que dans ce type de réseaux, grâce au brassage opaque, le réseau ne subit pas de contrainte de continuité et il a accès à des granularités d'agrégation très fines de l'ordre de 1Gbit/s. De plus l'agrégation opaque remplit au mieux les ressources et n'engendre pas de perte de capacités du au mauvais remplissage. Ceci permet d'avoir plus de ressources effectives à une charge donnée. Dans les réseaux multi-bandes OFDM nous avons la possibilité de réduire la granularité optique (dans ce type de réseau la granularité est le débit de la sous-bande) tout en maintenant la capacité de 100 Gbit/s du

canal WDM. On peut donc augmenter le nombre de sous-bandes par canal WDM pour réduire encore cette granularité. Pour évaluer l'impact du nombre de sous-bandes par canal WDM, nous comparons les performances de notre réseau pour 4 et 10 sous-bandes par canal WDM. Le choix de passer à 10 sous-bandes par canal WDM est ici arbitraire, l'idée est d'étudier l'impact de l'augmentation de la finesse des granularités dans les réseaux multi-bandes OFDM indépendamment des contraintes technologiques. Ces contraintes technologiques seront évoquées dans la dernière section IV.6. A débit par canal WDM constant, chaque sous-bande transporte un débit de 10 Gbit/s. Nous avons ainsi accès à plus de sous-bandes à l'intérieur d'une longueur d'onde (10 sous-bandes) avec des débits plus faibles (10 Gbit/s). La Figure IV-18 présente les performances du réseau multi-bande OFDM avec des canaux composés de 10 sous-bandes. La courbe rouge représentant les performances des réseaux multi-bandes OFDM pour des canaux composés de dix sous-bandes. La courbe montre que l'on se rapproche des performances des réseaux opaques. Augmenter le nombre de sous-bandes par canal optique de 4 à 10 augmente donc les performances des réseaux multi-bandes OFDM en moyenne de 36 %. Ce chiffre représente la moyenne des différences entre la courbe verte et la courbe rouge. Ceci est dû au fait qu'en augmentant le nombre de sous-bandes dans un canal WDM les granularités deviennent plus fines et par conséquent les canaux WDM sont mieux remplis. Par exemple, une demande de 30 Gbit/s utilisera 2 sous-bandes indépendantes pour le cas multi-bandes OFDM à 4 sous-bandes, chaque sous-bande ayant une capacité de 25 Gbit/s. Dans ce cas il reste seulement 2 sous-bandes utilisables et donc un débit total utilisable de 50 Gbit/s. Une demande de 60 Gbit/s sera donc bloquée. Par contre, si le canal optique est composé de 10 sous-bandes, la demande de 60 Gbit/s ne sera pas bloquée. En effet, dans ce cas, la première demande occupera 3 sous-bandes de 10 Gbit/s et la deuxième demande occupera 6 sous-bandes de 10 Gbit/s sur les 7 encore disponibles. Cependant, l'augmentation du nombre de sous-bandes par canal WDM peut s'avérer problématique et est directement relié à des contraintes technologiques.

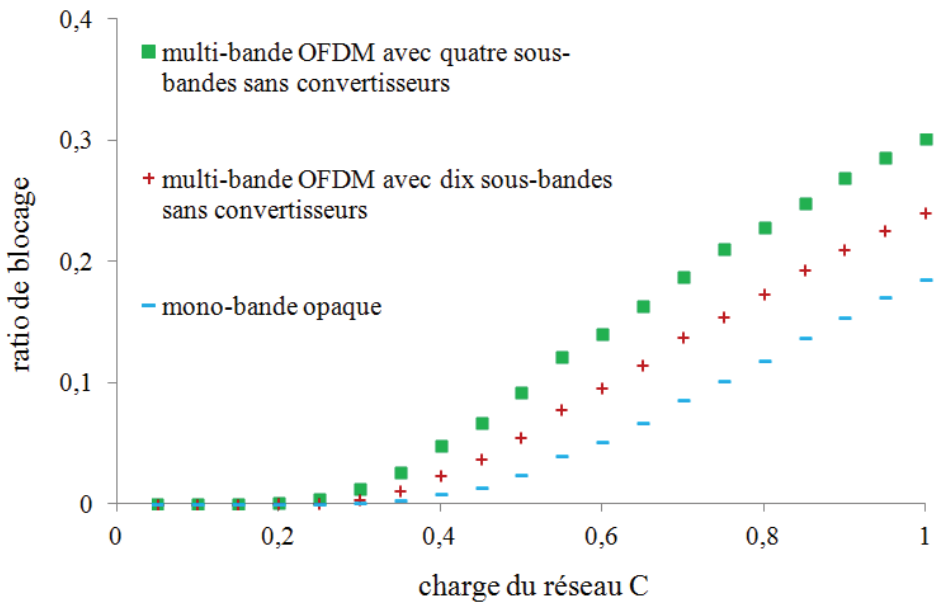


Figure IV-18 Taux de blocage dans le réseau mono-bande opaque et le réseau multi-bandes OFDM à 10 sous-bandes et à 4 sous-bandes

IV.5.5. Impact du changement de la topologie

Pour l'ensemble des résultats présentés dans le Chapitre IV. les simulations ont été appliquées à la topologie du réseau NSFnet. Afin de voir l'impact de topologie sur les réseaux multi-bandes OFDM, nous proposons d'exécuter les simulations sur une topologie totalement différente du réseau NSFnet. La topologie considérée représente une partie du réseau d'Orange Lab. Les caractéristiques de cette topologie sont exposées dans le Tableau IV-1. Pour cette topologie, nous nous sommes basé sur les mêmes hypothèses que pour la topologie NSFnet. La Figure IV-19 représente le ratio de blocage en fonction de la charge C du générateur. Les courbes de la ont la même allure que les courbes concernant le réseau NSFnet. La seule différence est que le point du premier blocage n'est pas le même que dans la topologie NSFnet. Ceci est dû à la distribution du trafic et à la topologie.

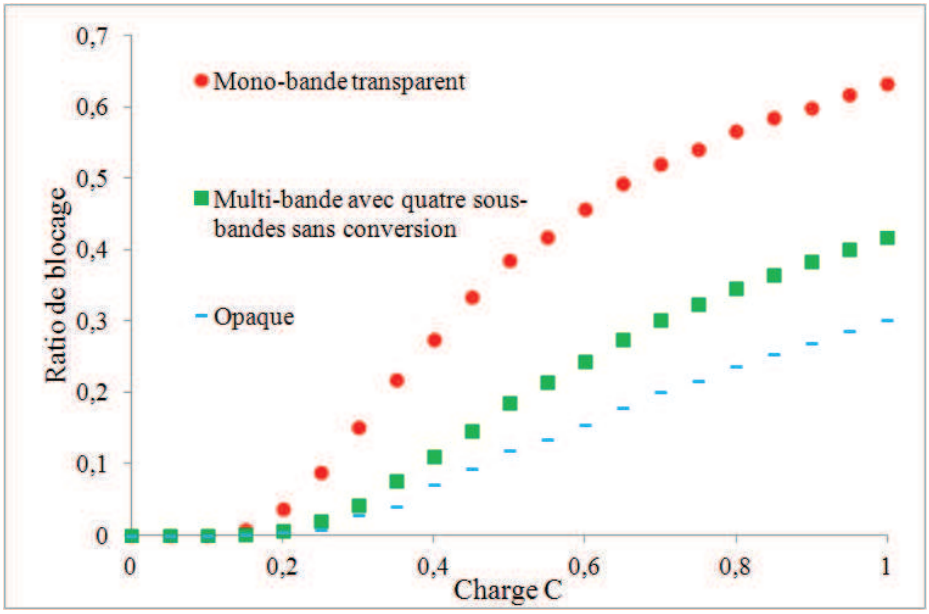


Figure IV-19 Taux de blocage pour les scenarios mono-bande transparent, mono-bande opaque et mono-bande transparent en fonction de la charge offerte par le générateur pour le réseau représentatif d'Orange

Nous avons étudié, dans le cas de cette topologie, l'impact du déploiement de la conversion de longueur d'onde sur les performances du réseau. Les résultats sont exposés dans la Figure IV-20.

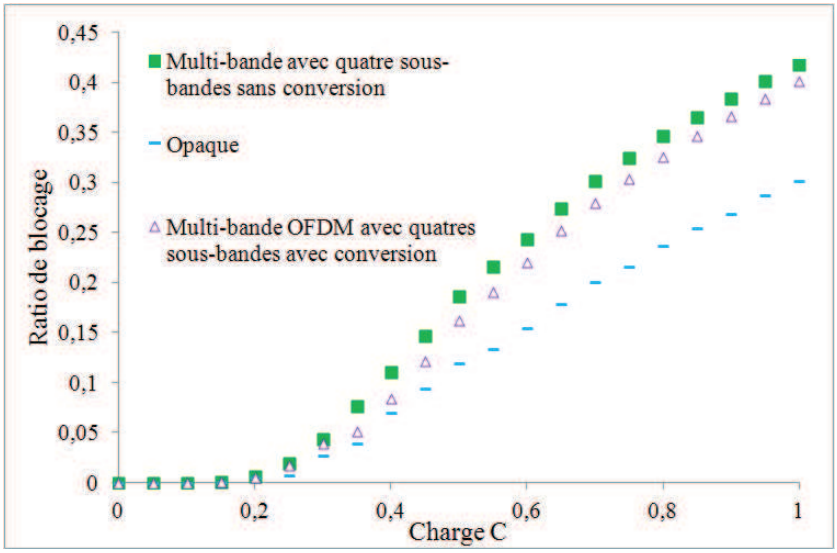


Figure IV-20 Impact du déploiement des convertisseurs sur les performances des réseaux multi-bandes OFDM dans le de la topologie d'Orange

Comme dans le cas de la topologie NSFnet, l'impact de la conversion de longueur d'onde n'est pas important (il est de 14% en moyenne) sur les performances totales du réseau. La conversion de longueur d'onde favorise toujours les demandes qui ont un chemin de plus d'1 saut sur les demandes à 1 saut. L'impact de l'augmentation de nombre de sous-bandes par canal WDM a lui aussi été étudié dans le cas de cette topologie. Nous avons simulé les performances du réseau multi-bande OFDM avec des canaux WDM composé de 10 sous-bandes.

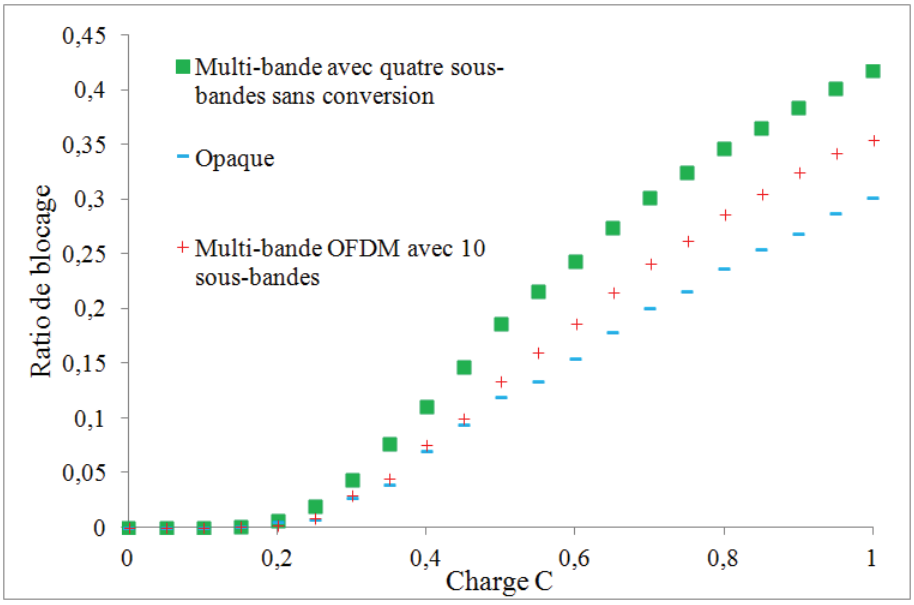


Figure IV-21 Taux de blocage dans le réseau mono-bande opaque et le réseau multi-bandes OFDM à 10 sous-bandes et à 4 sous-bandes dans le cas du réseau d'Orange

Comme dans le cas du réseau NSFnet, les performances de la technologie multi-bande à 10 sous-bandes s'approche plus du cas opaque. Nous avons montré que sur une topologie différente les allures de courbes de performances sont les même que dans le cas de la topologie NSFnet. La technologie multi-bande OFDM est indifférente à la variation de topologie.

IV.6. Contraintes technologiques liées au nombre de sous-bandes

Commençons d'abord par décrire les paramètres exposés dans la Figure IV-22 permettant de décrire la configuration d'un canal WDM utilisant une technologie multi-bande OFDM :

- Le paramètre Δ_{lambda} : il représente l'espacement entre canaux WDM.
- Le paramètre B : il représente la largeur spectrale de la sous-bande.
- Le paramètre Δ_G : il représente la bande de garde à soustraire de part et d'autre du canal à 50 GHz afin de tenir compte de la bande passante des filtres optiques utilisés pour le brassage des canaux WDM.
- Le paramètre $\Delta_{G'}$: il représente la bande de garde à respecter entre les sous-bandes afin de tenir compte de la bande passante des filtres optiques utilisés pour le brassage des sous-bandes.
- Le paramètre Δ_{SB} : il représente l'espacement entre les fréquences centrales des sous-bandes adjacentes.
- B_{filtre} : il représente la bande passante des filtres optiques.

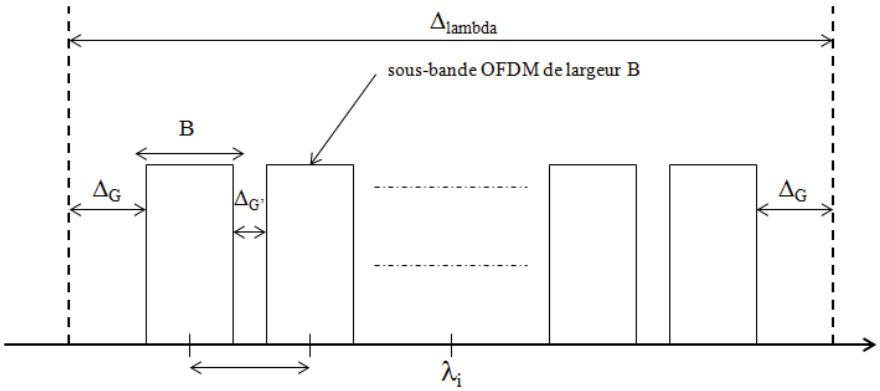


Figure IV-22 Schéma de principe du découpage d'un canal WDM en sous-bandes OFDM

Plusieurs configurations sont possibles en fonction du nombre de sous-bandes par canal WDM permettent d'avoir un canal WDM multi-bande de largeur spectrale 50 GHz et de débit 100 Gbit/s. La configuration utilisée dans la section IV.5.2 permet d'avoir quatre sous-bandes dans les 40 GHz de bande utile du canal WDM dont les paramètres sont représentés dans le

Tableau IV-4.

B : Bande effective des sous-bandes	8 GHz
Δ_{SB} : Espacement entre sous-bandes	10 GHz
$\Delta_{G'}$: Bande de garde entre sous-bandes voisines	2 GHz
R : Débit de la sous-bande avec multiplexage en	25 Gbit/s
Nombre des sous-bandes	4

Tableau IV-4 Configuration de référence $C_{\text{référence}}$

Pour pouvoir transporter 100 Gbit/s sur 4 sous-bandes dans les 40 GHz utile d'un canal WDM (configuration $C_{\text{référence}}$), la solution retenue est de générer des sous-bandes d'une largeur spectrale B de 8 GHz et espacées de 10 GHz. La bande de garde ($\Delta_{G'}$) est donc de 2 GHz. Cette solution permet d'une part de transporter des débits réduits par sous-bandes (25Gbit/s) et d'autre part de répondre aux contraintes technologiques imposées par le filtrage optique. En effet, la taille des sous-bandes ainsi que la bande de garde sont compatible avec les gabarits des filtres optiques aujourd'hui réalisables [35]. Actuellement les filtres disponibles sur le marché peuvent avoir une largeur spectrale minimale jusqu'à 4 GHz. Par conséquent, la largeur spectrale de la sous-bande peut être réduite encore. En gardant la même bande de garde entre les sous-bandes adjacentes et en réduisant la largeur spectrale des sous-bandes à 4 GHz, le canal WDM peut transporter dans ce cas 7 sous-bandes espacé de 6 GHz. Cette configuration ($C_{7\ \text{sous-bandes}}$) représentée dans le

Tableau IV-5 reste compatible avec le gabarit des filtres optiques disponibles.

B : Bande effective des sous-bandes	4 GHz
Δ_{SB} : Espacement entre sous-bandes	6 GHz
$\Delta_{G'}$: Bande de garde entre sous-bandes	2 GHz
R : Débit de la sous-bande	14,3 Gbit/s
Nombre des sous-bandes	7

Tableau IV-5Configuration $C_{7\ \text{sous-bandes}}$

Dans cette configuration ($C_{7\ \text{sous-bandes}}$), nous avons augmenté le nombre de sous-bandes, chacune transportant donc un débit moins important que dans $C_{\text{référence}}$. La modulation des sous-porteuses est adaptée afin de maintenir un débit total du canal WDM à 100 Gbit/s. Cette configuration représente la limite de découpage en sous-bandes du canal WDM avec ce type de filtres comme illustré dans la Figure IV-23.

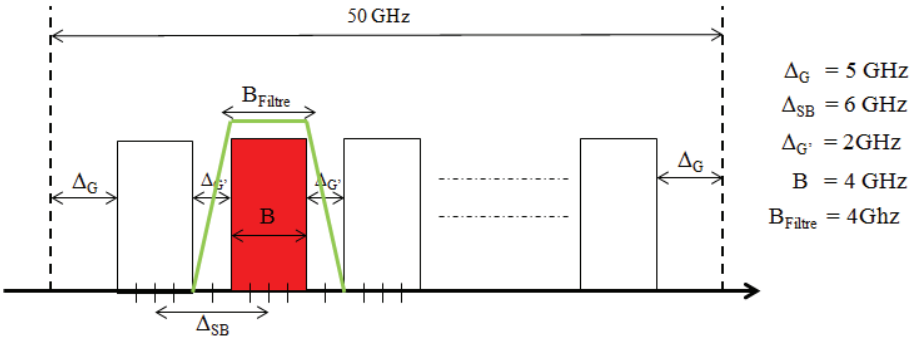


Figure IV-23 Exemple de filtrage dans le cas de la configuration $C_{7\ \text{sous-bandes}}$

En effet, réduire encore la taille de la sous-bande entrainerait une dégradation du signal au niveau du filtrage optique. Considérons par exemple une largeur de sous-bande égale à 3 GHz avec la même bande de garde entre sous-bande. L'espacement entre sous-bandes adjacentes devient égal à 5 GHz. En théorie, ceci permet d'avoir dans les 40 GHz de canal utile 8 sous-bandes indépendantes. Cette configuration noté $C_{8\ \text{sous-bandes}}$ est représentée dans le

Tableau IV-6.

B : Bande effective des sous-bandes	3 GHz
Δ_{SB} : Espacement entre sous-bandes	5 GHz
$\Delta_{G'}$: Bande de garde entre sous-bandes	2 GHz
R : Débit de la sous-bande avec multiplexage	12,5 Gbit/s
Nombre des sous-bandes	8

Tableau IV-6 Configuration $C_{8\ \text{sous-bndes}}$

Par contre, le filtrage d'une sous-bande va également filtrer une partie des sous-bandes voisines comme illustré dans la Figure IV-24 et donc dégrader le signal.

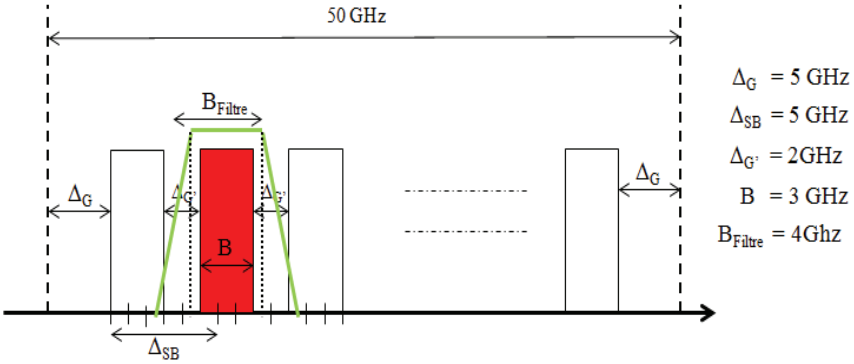


Figure IV-24 Exemple de filtrage dans le cas de la configuration $C_{8\ \text{sous-bndes}}$

Une manière de dépasser ces contraintes de filtrage et pouvoir mettre plus que 7 sous-bandes dans canal WDM serait d'augmenter l'intervalle de garde entre sous-bandes adjacentes et élargir la largeur spectrale du canal WDM. Pour un intervalle de garde de 3 GHz entre sous-bandes adjacentes, une découpe du canal WDM en 10 sous-bandes peut être réalisée. Par contre l'espacement entre les canaux WDM passera de 50 GHz à 75 GHz. Dans ces 75 GHz il y a 60 GHz de bande utile. Le

Tableau IV-7 illustre cette configuration noté $C_{10\ \text{sous-bandes 75 GHz}}$.

B : Bande effective des sous-bandes	3 GHz
Δ_{SB} : Espacement entre sous-bandes	6 GHz
$\Delta_{G'}$: Bande de garde entre sous-bandes voisines	3 GHz
R : Débit de la sous-bande avec multiplexage en	10 Gbit/s
Nombre des sous-bandes	10
Espacement entre canaux WDM	75 GHz
Bande utile du canal WDM	60 GHz

Tableau IV-7 Configuration $C_{10\ \text{sous-bandes 75 GHz}}$

Dans la Configuration $C_{10\ \text{sous-bandes 75 GHz}}$ un canal WDM de largeur spectrale 75 GHz peut être découpé en 10 sous-bandes de largeur B égale à 3 GHz et espacé de 6 GHz. Les sous-bandes adjacentes ont une bande de garde de 3 GHz. Le fait d'augmenter l'espacement entre canaux WDM à 75 GHz réduit leurs nombre par fibre. En effet, l'intervalle spectral utilisé dans la configuration $C_{\text{référence}}$, est occupé par 10 canaux WDM, il sera occupé dans cette configuration $C_{10\ \text{sous-bandes 75 GHz}}$ par 7 canaux WDM. La Figure IV-25 montre une illustration de filtrage dans le cas de la configuration $C_{10\ \text{sous-bandes 75 GHz}}$.

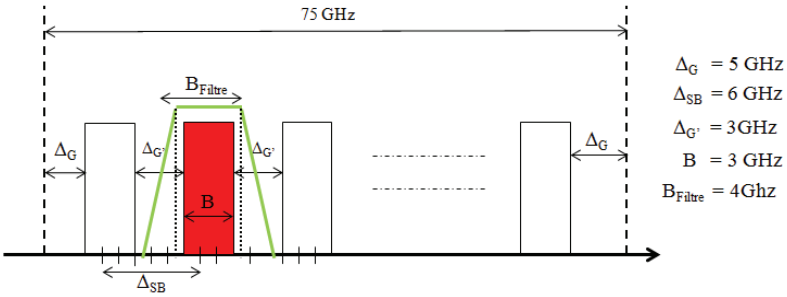


Figure IV-25 Exemple de filtrage dans le cas de la configuration $C_{10\ \text{sous-bandes 75GHz}}$

Le filtrage d'une sous-bande n'a aucun impact sur les sous-bandes adjacentes. Dans le cas $C_{10\ \text{sous-bandes 75 GHz}}$ nous avons moins de capacité par fibre mais plus de sous-bandes par canal que dans $C_{\text{référence}}$. Le

Tableau IV-8 représente la différence entre les trois configurations $C_{\text{référence}}$, $C_{7\ \text{sous-bandes}}$ et $C_{10\ \text{sous-bandes 75 GHz}}$.

	$C_{\text{références}}$	$C_{7\ \text{sous-bandes}}$	$C_{10\ \text{sous-bandes 75 GHz}}$
B	8 GHz	4 GHz	3 GHz
Δ_{SB}	10 GHz	6 GHz	6 GHz
$\Delta_{G'}$	2 GHz	2 GHz	3 GHz
R	25 Gbit/s	14,1 Gbit/s	10 Gbit/s
Nombre des sous-bandes	4	7	10
Nombre de canaux WDM	10	10	7
Nombre de sou-bandes par fibre	40	70	70
Δ_G	50 GHz	50 GHz	75 GHz
Bande utile du canal WDM	40 GHz	40 GHz	60 GHz

Largeur spectrale totale utilisée	500 GHz	500 GHz	450 GHz
Nombre de canaux WDM	10	10	6
Possibilité de filtrage de sous-bandes[1]	Oui	NON	OUI

Tableau IV-8 Récapitulatif des configurations $C_{\text{référence}}$, $C_{7\ \text{sous-bandes}}$ et $C_{10\ \text{sous-bandes 75 GHz}}$.

Nous allons maintenant comparer les différentes configurations exposées dans le

Tableau IV-8 en termes de blocage. La Figure IV-26 représente les performances du réseau multi-bande OFDM pour les trois configurations $C_{\text{référence}}$, $C_{7\ \text{sous-bandes}}$ et $C_{10\ \text{sous-bandes}}$.

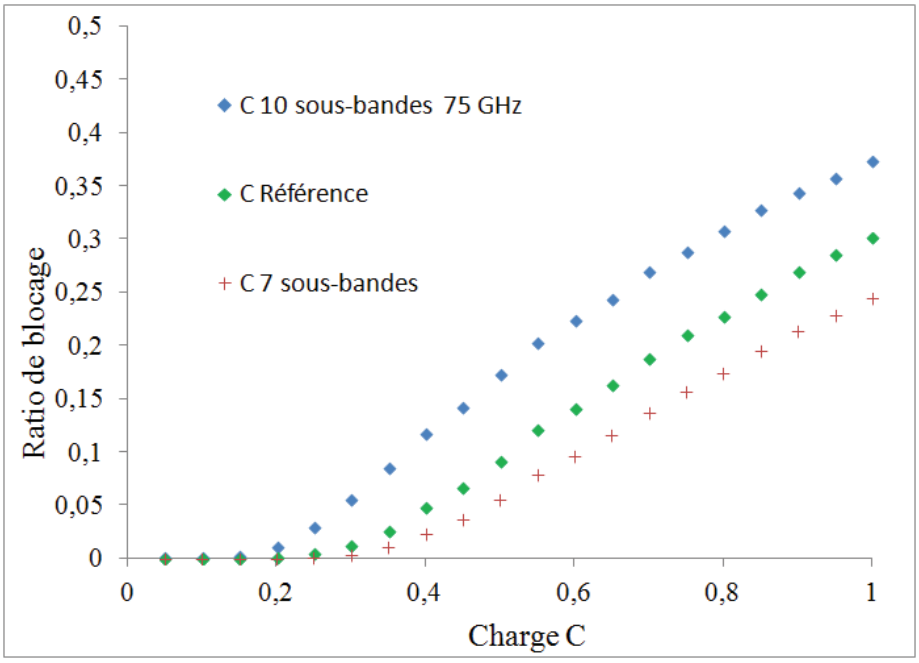


Figure IV-26 Performance en termes de blocage des configurations $C_{\text{référence}}$, $C_{7\ \text{sous-bandes}}$ et $C_{10\ \text{sous-bandes 75 GHz}}$

D'après les résultats de la Figure IV-26, la configuration $C_{10\ \text{sous-bandes 75 GHz}}$ est moins performante en termes de blocage que $C_{\text{référence}}$. Donc, avoir plus de sous-bandes par canal WDM et moins de canaux WDM par fibre n'augmente pas les performances des réseaux multi-bandes OFDM. La configuration $C_{7\ \text{sous-bandes}}$ est la plus performante car elle permet d'avoir plus de sous-bandes par fibre optique que dans $C_{\text{référence}}$.

[1] Avec les technologies actuellement disponibles

IV.7. Dépasser la contrainte de filtrage optique

Nous supposons maintenant que la taille minimale des filtres utilisés pour extraire les sous-bandes est de 2 GHz. Ces suppositions sont bien évidement théoriques. Ces types de filtres ont une pente de réjection identiques aux filtres précédents et nécessitent donc toujours une bande de garde entre sous-bandes adjacentes de 2 GHz. Pour pouvoir placer 10 sous-bandes dans les 40 GHz de bande utile du canal WDM, il faut donc que la largeur spectrale des sous-bandes soit de 2 GHz. Dans ce cas l'espacement entre sous-bandes adjacentes est de 4 GHz. En considérant le même débit par sous porteuses OFDM de façon à conserver la portée des canaux WDM, le débit de la sous-bande sera devisé en proportion de la bande passante par rapport à la configuration $C_{\text{référence}}$. Dans cette configuration notée $C_{10\ \text{sous-bandes}\ 50\ \text{GHz}}$ le débit par sous-bandes sera donc d'environ 7 Gbit/s. Le canal WDM de largeur utile de 40 GHz peut transporter un débit total de 70 Gbit/s. La configuration $C_{10\ \text{sous-bandes}\ 50}$ GHz est représentée dans le

Tableau IV-9.

B : Bande effective des sous-bandes	2 GHz
Δ_{SB} : Espacement entre sous-bandes	4 GHz
$\Delta_{G'}$: Bande de garde entre sous-bandes	2 GHz
R : Débit de la sous-bande avec multiplexage	7 Gbit/s
Nombre des sous-bandes	10
Espacement entre canaux WDM	50 GHz
Bande utile du canal WDM	40 GHz
Débit totale du canal WDM	70 Gbit/s
Nombre de canaux WDM	10

Tableau IV-9 Configuration $C_{10\ \text{sous-bandes}\ 50}$ GHz

Cette configuration $C_{10\ \text{sous-bandes 50 GHz}}$ est compatible avec un espacement de 50 GHz entre canaux WDM mais avec un débit réduit à 70 Gbit/s par canal WDM. La configuration $C_{10\ \text{sous-bandes 75}}$ GHz, quant à elle, conserve un débit de 100 Gbit/s par canal WDM mais avec un espacement de 75 GHz. Autrement dit, pour pouvoir mettre plus de sous-bandes dans un canal WDM il faut accepter soit d'augmenter la largeur spectrale du canal WDM et donc d'augmenter ainsi l'espacement entre les canaux WDM, soit de réduire le débit par sous-bande et par conséquent réduire le débit par canal WDM en conservant un espacement de 50 GHz en canaux WDM. Le

Tableau IV-10 résume les différentes configurations par rapport à $C_{\text{référence}}$ (4 sous-bandes dans un canal WDM de 50 GHz et un débit de 100 Gbit/s).

	$C_{\text{référence}}$	$C_{10\ \text{sous-bandes 75 GHz}}$	$C_{10\ \text{sous-bandes 50 GHz}}$
Nombre de canaux WDM dans le même espacement spectral	10	7	10
Débit par canal WDM	100 Gbit/s	100 Gbit/s	70 Gbit/s
Nombre de sous-bandes par canal WDM	4	10	10
Débit par sous-bandes	25 Gbit/s	10 Gbit/s	7 Gbit/s

Tableau IV-10 récapitulatif des configurations $C_{\text{référence}}$, $C_{10\ \text{sous-bandes 75 GHz}}$, $C_{10\ \text{sous-bandes 50 GHz}}$

En se basant sur ces applications numériques, nous comparons les performances des différentes configurations du

Tableau IV-10. Ces performances sont représentées dans la Figure IV-27.

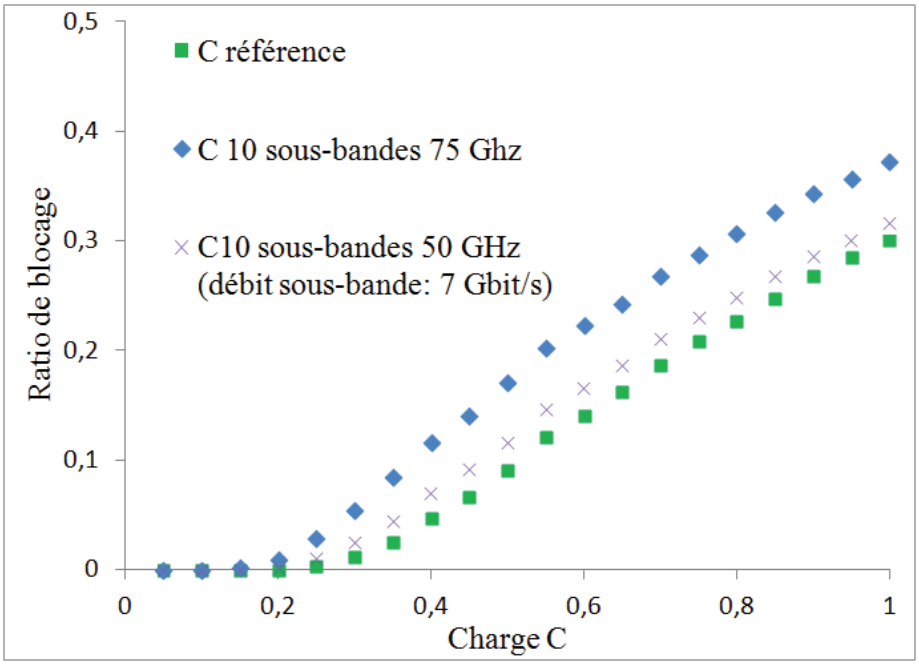


Figure IV-27 Performance en termes de blocage des configurations $C_{référence}$, $C_{10\ sous\text{-}bandes\ 75\ GHz}$, $C_{10\ sous\text{-}bandes\ 50\ GHz}$

La configuration $C_{10\ sous\text{-}bandes\ 50\ GHz}$ tend plus en termes de performance de blocage vers la configuration $C_{référence}$ que la configuration $C_{10\ sous\text{-}bandes\ 75\ GHz}$. Cela montre qu'augmenter le nombre de sous-bandes par canal WDM avec des débits moins important peut augmenter les performances des réseaux multi-bandes OFDM. Si des filtres de largeur minimale égale à 1 GHz en conservant la même pente de réjection sont développés dans l'avenir, un canal WDM de bande utile de 40 GHz pourrait être découpé en 13 sous-bandes de largeur égale à 1 GHz et espacé de 3 GHz. Dans ce cas le débit de chaque sous-bande serait de 4 Gbit/s. les performances en termes de blocage vont s'améliorer peut être mais probablement cette amélioration ne compense pas le surcoût des transpondeurs. En effet un transpondeur qui génère 13 sous-bandes est plus complexe qu'un transpondeur qui génère 4 sous-bandes et par conséquent plus coûteux. D'autre part et mis à part le surcoût lié aux équipements le fait de mettre autant de sous-bandes dans un canal multi-bande diminuera considérablement l'efficacité spectrale. Enfin pour conclure ces discussions, il faut tenir qu'à capacité équivalent, la granularité des sous-bandes représente le critère le plus important pour les performances en termes de blocage.

IV.8. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons étudié les performances de l'architecture d'un réseau multi-bandes OFDM optique. Nous avons conçu, en nous basant sur le simulateur OMNET++, trois modèles de simulation pour les trois architectures étudiées : mono-bande transparent, mono-bande opaque et multi-bande OFDM. A partir de ces simulateurs, nous avons évalué les performances de l'architecture des réseaux multi-bandes OFDM par rapport à celles des réseaux mono-bandes opaques et mono-bandes transparents. Nous avons calculé pour chaque type d'architecture de réseau optique, le taux de blocage en fonction de la charge des générateurs de trafic. Nous avons montré que les réseaux multi-bandes OFDM sont moins performants que les réseaux mono-bandes opaques, mais qu'ils offrent de meilleures performances que celles des réseaux mono-bandes transparents. Grâce à l'analyse des différentes sources de blocage, nous avons constaté que ce type de réseau était majoritairement impacté par du blocage lié aux contraintes de continuité de canaux WDM et de sous-bandes OFDM. Nous avons donc étudié l'impact du déploiement de convertisseurs de longueur d'onde / sous-bandes dans les réseaux multi-bandes OFDM pour résoudre cette source de blocage. Contre toute attente, les convertisseurs n'ont pas un impact important sur les performances totales du réseau. Par contre, ils permettent d'accepter des demandes plus longues en nombre de sauts et rendent de ce fait l'attribution des ressources plus équitable.

Nous avons par la suite augmenté le nombre de sous-bandes par canal WDM et étudié les réseaux multi-bandes OFDM avec des canaux WDM composés de 10 sous-bandes. Là, les performances en terme de blocage sont nettement meilleures que celles obtenu avec 4 sous-bandes et conversion de longueur d'onde/ sous-bande. En effet le fait d'augmenter le nombre de sous-bandes par canal optique réduit la granularité et par conséquent les canaux WDM sont mieux remplis. Cependant, l'augmentation du nombre de sous-bandes par canal WDM est limitée par des contraintes technologiques et notamment par la précision du filtrage optique nécessaire à l'agrégation/désagrégation des sous-bandes. Pour cette raison, dans la section IV.6 nous avons étudié les différentes contraintes physiques liées à ce filtrage optique. Nous avons démontré que la technologie multi-bande OFDM, dans sa configuration de référence réalisable aujourd'hui (4 sous-bandes par canal WDM), est intéressante par rapport aux technologies tendancielles. Ces performances en termes de blocages pourront même

augmenter avec l'évolution des performances des filtres optiques utilisés dans le commutateur de sous-bandes. En résumé, plus les filtres sont fins plus les performances en termes de blocage sont meilleurs.

Chapitre V. « Dimensionnement » des réseaux multi-bandes OFDM optiques

V.1. Introduction

Ce chapitre conclut l'étude menée sur l'opportunité de la technologie multi-bande OFDM dans les futurs réseaux de transport optique. Dans le chapitre précédent, nous avons étudié les performances en termes de blocage des réseaux multi-bandes OFDM. Nous nous sommes principalement intéressés à l'impact de la commutation de sous-bandes sur les performances du réseau en termes de blocage des demandes. Dans ce chapitre nous nous intéressons au dimensionnement et au coût. Le dimensionnement du réseau consiste à calculer le nombre d'équipements nécessaires et à déterminer leur emplacement dans le réseau pour satisfaire un ensemble de contraintes dont ; le trafic à écouler (les demandes), la disponibilité du réseau (protection, choix des chemins, la latence des services, ….). Dans notre cas nous nous focalisons uniquement sur un dimensionnement pour satisfaire un ensemble de demandes connues et nous nous ne tenons pas compte de la protection. Typiquement, le problème de dimensionnement du réseau considère une matrice de trafic et vise à choisir et placer les ressources nécessaires pour véhiculer ce trafic d'une façon optimale en se basant sur certaines métriques de performance. Dans ce chapitre, la métrique de performance utilisée est le coût des équipements à installer. Nous allons considérer les transpondeurs et les fonctions de commutations. Nous calculons, pour chacune des technologies multi-bande OFDM et mono-bande transparente, le coût du déploiement de ces équipements dans un réseau métropolitain et un réseau cœur. La suite de ce chapitre s'articule comme suit. La première section décrit brièvement les différentes architectures fonctionnelles que l'on peut envisager pour un transpondeur multi-bande OFDM. La seconde section évalue le coût de déploiement de cette

technologie dans les réseaux métropolitains. Le troisième paragraphe de ce chapitre évalue quant à lui, le coût de déploiement de la technologie multi-bande OFDM dans un réseau cœur.

V.2. Architecture des transpondeurs multi-bandes OFDM

L'architecture d'un transpondeur WDM peut être divisée en deux parties. Une partie assurant le traitement numérique du signal notée DSP [56] (Digital Signal Processing) par la suite et une autre, la tête optique d'émission et réception (notée Tx/Rx), servant à la conversion du signal électrique en un signal optique coloré transporté par une longueur d'onde et inversement. Aujourd'hui, il n'existe pas d'architecture définie pour des transpondeurs multi-bandes OFDM et pour l'instant aucune architecture de transpondeurs multi-bandes OFDM n'a été commercialisée. De ce fait, plusieurs propositions restent envisageables. La Figure V-1 illustre les différentes architectures proposées dans le projet 100G FLEX [57].

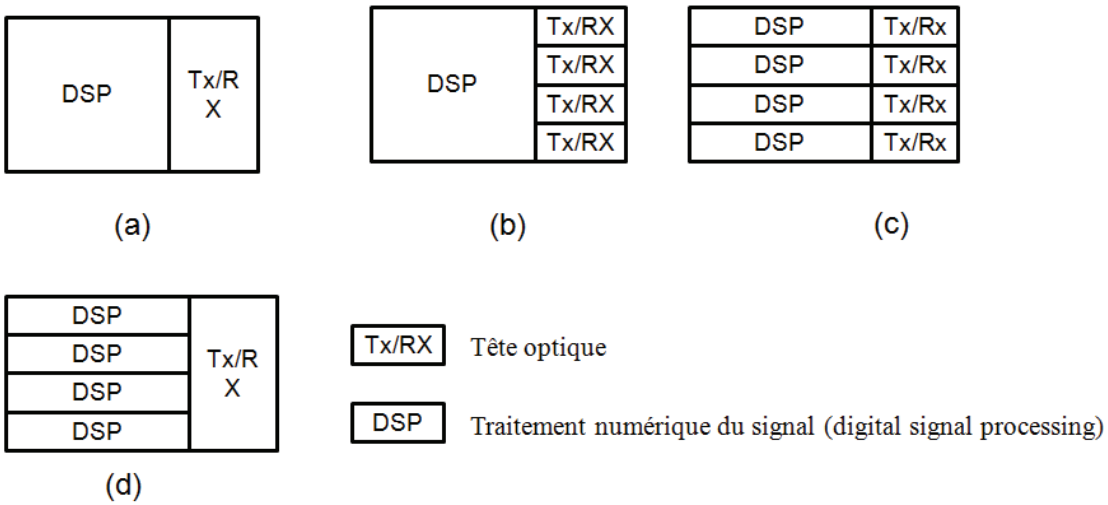


Figure V-1 Différentes architectures possibles pour un transpondeur multi-bande OFDM pour un canal WDM composé de quatre sous-bandes.

L'architecture (a) considère un seul bloc pour la génération du canal WDM multi-bande. Cette architecture comme les 3 autres nous fournit un canal WDM multi-bande composé de *n*

sous-bandes indépendantes. L'avantage de cette architecture est que les différentes sous-bandes de ce canal WDM peuvent être routées indépendamment les unes des autres. L'inconvénient est que si le trafic à transporter est très inférieur à la capacité du canal WDM, certaines sous-bandes seront générées alors même qu'elles ne transporteront aucun trafic. Cette architecture de transpondeur semble donc plus pertinente pour les réseaux cœur où le trafic est plus important par rapport aux réseaux métropolitains. L'architecture (b) mutualise la partie traitement numérique du signal et associe à chaque sous-bande une tête optique. Cette architecture semble la moins probable puisqu'elle dissocie les têtes optiques, ce qui suppose une augmentation des coûts, sans réellement bénéficier de la flexibilité offerte par l'architecture (c). Notons également que la mutualisation du DSP ne peut se faire en pratique que de façon partielle puisque la plupart des algorithmes utilisés pour le traitement du signal restera indépendant pour chacune des sous bandes. En effet, les contraintes de propagation pouvant varier d'une sous-bande à l'autre (différents chemins empruntés par chaque sous bande), les paramètres d'égalisation du DSP convergeront vers des valeurs différentes. L'architecture (c) définit pour chaque sous-bande un bloc, que nous appelons slot dans la suite, composé d'une partie traitement numérique du signal et d'une partie tête optique. Cette architecture est la plus flexible et n'implique pas de surcoût important par rapport à l'architecture (b) à cause du fonctionnement indépendant du DSP pour chaque sous-bande. En effet, nous pouvons envisager un transpondeur multi-bande OFDM dans lequel des slots « sous-bande » sont installés selon le besoin de trafic à transporter. Cette architecture sera utilisée dans les réseaux métropolitains car elle est la plus adaptée à des débits plus faibles comme ceux que nous considérons dans les réseaux métropolitains. L'architecture (d) mutualise la partie tête optique et sépare les parties traitement numérique du signal. Cette architecture est intéressante et finalement très proche de l'architecture (a). N'offrant pas de flexibilité particulière, en terme réseau, elle peut être vue comme une possibilité d'implémentation de l'architecture (a). Dans notre étude nous retenons l'architecture (a) pour les réseaux cœurs et l'architecture (c) pour les réseaux métropolitains. Nous considérons pour l'architecture (a) des transpondeurs d'un débit total de 100 Gbit/s et pour l'architecture (c) des transpondeurs pouvant atteindre 100 Gbit/s de débit. Dans l'architecture (c) nous avons la possibilité de rajouter des slots de sous-bandes jusqu'à atteindre 100 Gbit/s. A chaque architecture nous avons associé un modèle de coût. Pour les réseaux métropolitains, les flux

de trafic transportés dans le réseau nécessite des débits de l'ordre de 10 Gbit/s, le coût d'un slot multi-bande OFDM sera donc exprimé en fonction de celui d'un transpondeur 10 Gbit/s WDM. Pour les réseaux cœurs, Les flux de trafic transportés dans le réseau nécessite des débits de l'ordre de 100 Gbit/s [58], le coût d'un transpondeur 100 Gbit/s multi-bande OFDM sera donc exprimé en fonction du coût d'un transpondeur mono-bande 100 Gbit/s WDM. Soit $C_{multi\text{-}bande}$ le coût d'un transpondeur 100 Gbit/s multi-bande OFDM. Par hypothèse, nous considérons que ce coût est le même pour les quatre architectures proposées de la Figure V-1. Soit $C_{sous\text{-}bande}$ le coût d'un slot de sous-bande OFDM (slot de l'architecture (c)). Soit C_{100WDM} et C_{10WDM} les coûts respectives des transpondeurs mono-bande 100 Gbit/s WDM et mono-bande 10 Gbit/s WDM. Soit *n* le nombre de sous-bandes maximales que peut transporter un canal WDM. Nous avons par définition :

$$C_{multi-bande} = \alpha * n * C_{sous-bande} \qquad \textbf{Équation V-1}$$

$$C_{multi-bande} = \mu * C_{100WDM} \qquad \textbf{Équation V-2}$$

L' Équation V-1 signifie que le coût d'un transpondeur multi-bande correspond au coût de la somme des slots de sous-bandes dans le canal avec un facteur α. Le paramètre α représentent un éventuelle surcoût ou économie selon que α >1 ou <1. Dans le cas de l'architecture (a) la mutualisation de le tète optique et de la partie DSP peut avoir un impact sur le coût d'un transpondeur multi-bande OFDM par rapport à un n slot de sous-bandes. Dans la suite de ce chapitre, pour simplifier l'étude nous supposons que α=1. L'Équation V-2 représente le coût d'un transpondeur multi-bande OFDM par rapport au coût d'un transpondeur mono-bande 100 Gbit/s. Le paramètre μ représente la proportion de coût d'un transpondeur multi-bande OFDM 100 Gbit/s (architecture (a)) et le coût d'un transpondeur mono-bande 100 Gbit/s WDM. Le facteur μ peut-être un éventuel surcoût ou économie selon que μ >1 ou <1. A travers ces équations nous cherchons à trouver un ordre de grandeur pour le coût de la génération d'une sous-bande. L'Équation V-1 et l'Équation V-2 nous permettent d'avoir :

$$C_{sous-bande} = \mu * \frac{C_{100WDM}}{\alpha * n} \qquad \textbf{Équation V-3}$$

Mais jusqu'à aujourd'hui, aucune donnée claire n'est disponible pour modéliser le coût d'une sous-bande. Par conséquent nous utilisons les relations de coût existantes entre les transpondeurs 100 Gbit/s et les transpondeurs 10 Gbit/s. Dans un « white paper » à Orange Lab's les auteurs ont exprimé le seuil de coût que devrait avoir un transpondeur 100 Gbit/s par rapport à celui d'un 10 Gbit /s pour que la solution 100 Gbit /s soit plus économique que 10 transpondeurs à 10 Gbit /s. Ce ratio de coût (6,5) prend notamment en compte la nécessité de rajouter des régénérateurs quand c'est nécessaire et un gain de CAPEX d'au moins 10% par rapport à la solution déployée pour justifier du déploiement d'une nouvelle technologie. Cette valeur est prise comme référence de coût pour un canal 100 Gbit/s pour la suite des études et la relation entre les deux coûts est illustrée dans l'Équation V-4.

$$C_{100WDM} = 6{,}5 * C_{10WDM}$$ **Équation V-4**

Par conséquent, nous pouvons exprimer le coût d'un slot de sous-bande $C_{sous\text{-}bande}$ en fonction du coût d'un transpondeur 10 Gbit/s :

$$C_{sous-bande} = 6{,}5 * C_{10WDM} * \frac{\mu}{\alpha * n}$$ **Équation V-5**

Nous utilisons les équations Équation V-2 et Équation V-5 afin de calculer le coût du déploiement des transpondeurs multi-bandes OFDM dans le réseau métropolitain et le réseau cœur. Bien évidemment, il est tout-à-fait possible et assez aisé de modifier les constantes de ces équations pour s'adapter à des changements technologiques qui surviendraient.

V.3. Evaluation de la technologie multi-bande OFDM sur les réseaux métropolitains

Nous proposons ici de déterminer le nombre de transpondeurs multi-bandes à installer dans un réseau métropolitain pour satisfaire la matrice de trafic proposée. Nous comparons par la suite l'architecture multi-bande OFDM à une architecture 10 Gbit/s WDM. Les caractéristiques essentielles de l'architecture typique du réseau métropolitain considérée sont exposées dans le

Tableau V-1.

Taille du réseau	45 nœuds		59 liens
Longueur maximale entre deux nœuds			350 km
Volume du trafic			145 Gbit/s
Moyenne des débits des demandes			3,2 Gbit/s
	Moyenne	Minimum	Maximum
Longueur des liens	39,4 km	1 km	110,1 km
Degré moyen des nœuds	2,6	1	8

Tableau V-1 caractéristique du réseau étudié

Le réseau métropolitain étudié est composé de 45 nœuds et de 59 liens. Les liens ont une longueur moyenne de 39,5 km (le lien le plus court est de 1 km, le lien le plus long est de 110,1 km). La longueur maximale du chemin entre 2 nœuds est de 350 km. Le degré de connectivité des nœuds varie d'un minimum de 1 à un maximum de 8. La connectivité moyenne est 2.6. L'étude menée prendra en considération une matrice de trafic projeté à l'horizon 2015 représentant un volume total de trafic circulant sur le réseau de 145 Gbit/s avec un volume moyen par flux de trafic de 3.2 Gbit/s. La Figure V-2 schématise la topologie du réseau métropolitain étudié. Cette topologie est représentative d'un réseau métropolitain d'Orange. Une autre topologie sera utilisée pour le réseau cœur.

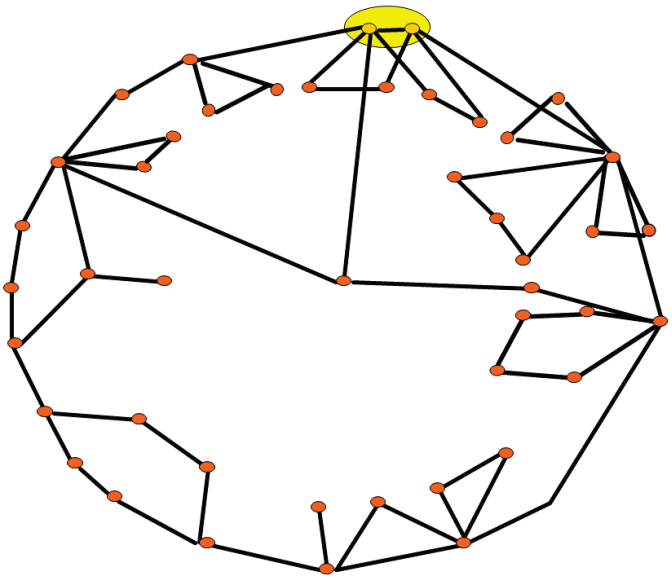
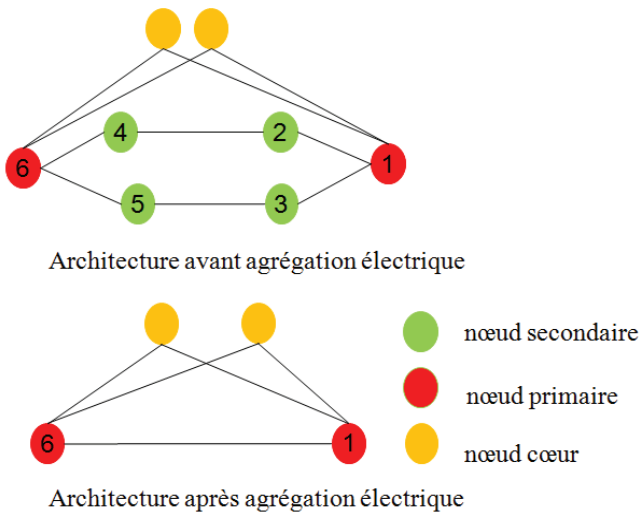


Figure V-2 Topologie du réseau métropolitain étudié

Les nœuds encerclée en vert sont appelés nœuds cœur, ils constituent l'interface avec le réseau cœur. Les nœuds colorés en orange représentent les nœuds du réseau métropolitain,

nous les appelons nœuds métropolitains. Tout le trafic sur le réseau circule entre les nœuds cœurs et les nœuds métropolitains. C'est-à-dire, tout le trafic des nœuds métropolitains remonte vers les nœuds cœurs, où bien redescend des nœuds cœurs vers les différents nœuds métropolitains. Le trafic qui circule dans le réseau, des nœuds métropolitains vers les nœuds cœur, présente des affluents très petits par rapport au trafic que peut véhiculer un canal WDM à 10Gbit/s dans le réseau métropolitain. Dans la matrice de trafic nous avons des demandes dont le débit est de seulement quelques Mbit/s. Dans un premier temps les demandes présentant un débit inférieur à un seuil donné seront transmises au nœud le plus proche émettant des demandes supérieures à ce seuil. Ce choix de routage dit « indirect » permet une meilleure utilisation des canaux WDM. Ces nœuds sont appelés nœuds primaires et les nœuds ayant des demandes inférieures au seuil sont appelés nœuds secondaires. Les nœuds primaires sont équipés pour faire de l'agrégation électrique. Par la suite, le trafic agrégé est échangé entre ces nœuds primaires et les nœuds cœurs. De la même façon, le trafic provenant des nœuds cœurs sera d'abord transmis aux nœuds primaires et par la suite distribué vers les nœuds secondaires. Dans le réseau métropolitain, nous pouvons donc considérer deux parties ; un réseau secondaire pour faire de l'agrégation électrique des affluents de débit faible et un réseau primaire permettant d'échanger du trafic entre les nœuds primaires et les nœuds cœurs. La Figure V-3 illustre un exemple d'agrégation dans la partie secondaire du réseau métropolitain. Elle représente l'architecture avant et après agrégation électrique.



S	D	Débit
1	Nœud cœur	2,1 Gbit/s
2	Nœud cœur	0,96 Gbit/s
3	Nœud cœur	1,4 Gbit/s
4	Nœud cœur	1 Gbit/s
5	Nœud cœur	0,5 Gbit/s
6	Nœud cœur	3 Gbit/s

Figure V-3 Cas de nécessité d'agrégation dans la partie secondaire du réseau

Chaque nœud de la figure V-3 envoie et reçoit du trafic des nœuds cœurs. Dans cet exemple, seulement le trafic en direction des nœuds cœurs est considéré. Nous supposons que le seuil du débit minimal que peut avoir une demande vers les nœuds cœurs est de 1,5 Gbit/s. Ce seuil est appelé seuil d'agrégation. Le débit des demandes provenant des nœuds 2, 3, 4 et 5 est inférieur à ce seuil. Chaque demande va donc d'abord être transmise au nœud le plus proche ayant une demande dont le débit est supérieur au seuil choisi. Les demandes des nœuds 2 et 3 sont transmises au nœud le plus proche qui est le nœud 1. Les demandes des nœuds 4 et 5 sont quant à elles transmises au nœud le plus proche qui est le nœud 6. Au niveau des nœuds 1 et 6 toutes les demandes seront agrégées et par la suite retransmises au nœud cœurs en tant qu'une seule demande. Le nœud 1 et le nœud 6 sont appelés nœuds primaires. Les nœuds 2, 3, 4 et 5 sont appelés nœuds secondaires.

Source	Destination	Débit
1	Nœud Edge	1,4+0,96+2,1= 4,46Gbit/s
6	Nœud Edge	1+0,5+3=4,5 Gbit/s

Tableau V-2 Trafic échangé entre les nœuds primaires et nœuds Edge

Le trafic émit par les nœuds primaires 1 et 6 de l'exemple de la Figure V-3 est illustré dans le Tableau V-2.

V.3.1. Calcul du nombre de transpondeurs dans les réseaux métropolitains

Nous supposons que les nœuds primaires et les nœuds secondaires sont connectés avec des systèmes 10 Gbit/s WDM et que les nœuds primaires sont équipés de routeurs pour faire de l'agrégation électrique. Pour nos études, nous avons défini plusieurs seuils d'agrégation. Pour chaque valeur du seuil d'agrégation, le nombre de slots multi-bandes OFDM et le nombre de transpondeurs dans le cas la technologie mono-bande 10 Gbit/s sont calculés. Pour chaque seuil d'agrégation la distribution du trafic dans le réseau primaire change. Ceci permet de voir l'impact de la variation des débits de demandes sur le coût des réseaux multi-

bandes OFDM. Nous considérons trois scenarios de découpage en sous-bandes du canal multi-bandes OFDM déjà étudié dans le chapitre III :

- Scenario $C_{\text{référence}}$ (canal multi-bande composé de 4 sous-bandes) : le débit par sous-bande est de 25 Gbit/s
- Scenario $C_{\text{8 sous-bandes}}$ (canal multi-bande composé de 8 sous-bandes) : le débit par sous-bande est de 12,5 Gbit/s
- Scenario $C_{\text{10 sous-bandes}}$ (canal multi-bande composé de 10 sous-bandes : le débit par sous-bande est de 10 Gbit/s

Ces scenarios ont été choisis indépendamment des contraintes technologiques liées aux problématiques de filtrage optique. Notons que le débit du canal multi-bande est constant pour les trois scénarios et égal à 100 Gbit/s. Ceci permet d'étudier l'impact de la variation de la granularité sur le coût du réseau métropolitain. Dans notre étude la longueur maximale d'un chemin entre deux nœuds est 350 km. Nous supposons que la portée des transpondeurs est supérieure à cette longueur [59]. Par conséquent, la régénération n'est donc pas utilisée dans le réseau étudié. Nous comparons les différents scenarios multi-bandes OFDM au scenario tendanciel utilisant une technologie optique mono-bande 10 Gbit/s WDM. Pour ce cas le même découpage en réseau secondaire et primaire est considéré. La Figure V-4 présente le résultat de dimensionnement du réseau métropolitain.

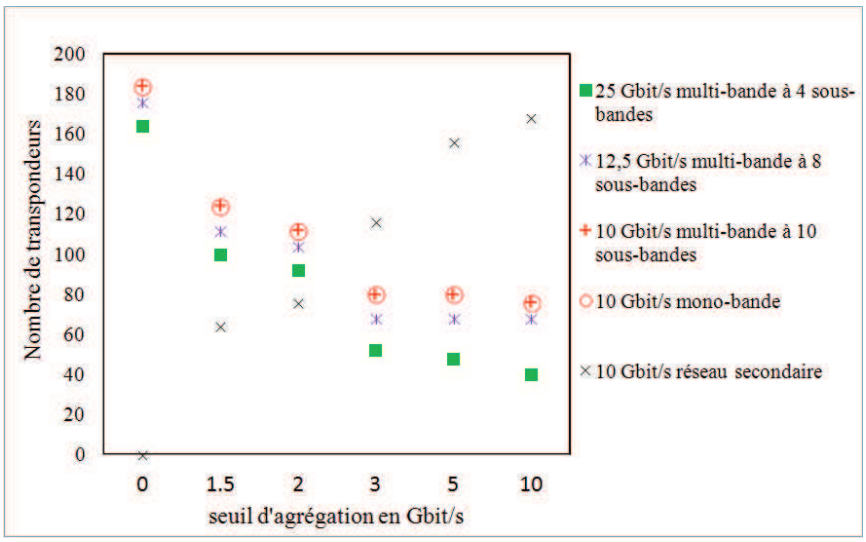


Figure V-4 Influence du seuil d'agrégation sur le nombre de transpondeurs nécessaire dans le réseau métropolitain proposé et pour les différents scenarios de modulation

Elle illustre le nombre de transpondeurs utilisés au niveau du réseau secondaire ainsi que le nombre de transpondeurs utilisés au niveau du réseau primaire pour les différents scenarios de la technologie multi-bande OFDM et pour le scenario tendanciel 10 Gbit/s WDM en fonction de différents seuils d'agrégation. Nous remarquons qu'au niveau du réseau secondaire, plus le seuil d'agrégation augmente plus le nombre de transpondeurs augmente. En effet, en augmentant le seuil d'agrégation, un plus grand nombre de flux est agrégé au niveau des nœuds primaires et par conséquent le nombre de transpondeurs WDM augmente au niveau du réseau secondaire. Par contre, le nombre de transpondeurs dans le réseau primaire diminue avec l'augmentation du seuil d'agrégation. Ceci est dû au fait que le nombre de nœuds dans le réseau primaire diminue et que les interfaces des slots de sous-bandes sont mieux remplis avec l'augmentation du seuil d'agrégation. De ce fait plus on agrège, moins d'équipements sont utilisés dans le réseau. Dans l'exemple de la Figure V-3, si le seuil d'agrégation est fixé à 2.5 Gbit/s, le nœud 1 devient un nœud secondaire et la demande du nœud 1 vers les nœuds métropolitains sera agrégée avec les autres demandes au niveau du nœud 6. Le nœud 6 seul sera chargé de transmettre le trafic vers les nœuds cœurs. Par conséquents moins de transpondeurs seront utilisés. Concernant la variation de la granularité des sous-bandes, nous remarquons que plus la granularité de sous-bandes par canal WDM augmente moins de transpondeurs sont utilisés. En effet augmenter la capacité permet de mettre plus de trafic dans une sous-bande. Par contre ceci n'est pas proportionnel à l'augmentation de la capacité et dans certains cas des sous-bandes à 25 Gbit/s transportent des débits de quelques Gbit/s.

V.3.2. Coût des différents scénarios

En se basant sur le dimensionnement précédent, nous calculons le coût pour chaque scenario de la technologie multi-bande OFDM et la technologie tendancielle 10 Gbit/s WDM en utilisant l'Équation V-5. Nous supposons, dans un premier temps, que le coût d'un transpondeur multi-bande OFDM 100 Gbit/s est le même qu'un transpondeur 100 Gbit/s WDM mono-bande (μ=1) et que le coût d'un transpondeur multi-bande est égale à *n* fois le coût d'un slot multi-bande de débit 100/n Gbit/s (α=1). L'Équation V-5 devient :

$$C_{sous-bande} = \frac{6,5}{n} * C_{10WDM}$$ **Équation V-6**

Le modèle de coût est représenté dans le

Tableau V-3.

Scénario	Coût par rapport 10 Gbit/s WDM
10 Gbit/s WDM	1
Coût d'une sous-bande $C_{\text{référence}}$	1,625
Coût d'une sous-bande $C_{8\ \text{sous-bandes}}$	0.812
Coût d'une sous-bande C_{10}sous-bandes	0.65

Tableau V-3 Modele de coûts pour les différents scenarios étudiés

Le

Tableau V-3 expose une application numérique de l'Équation V-5. Il représente le coût d'une sous-bande pour les trois différents scenarios. Pour chaque scenario multi-bande OFDM, la valeur du ratio par rapport au coût d'un transpondeur 10 Gbit/s WDM est illustré dans le tableau pour α et μ égale à 1. La Figure V-5 représente le coût des différents scenarios considérés pour la technologie multi-bande OFDM par rapport à la technologie 10 Gbit/s WDM pour le réseau primaire. Ce coût est représenté en fonction des seuils d'agrégation.

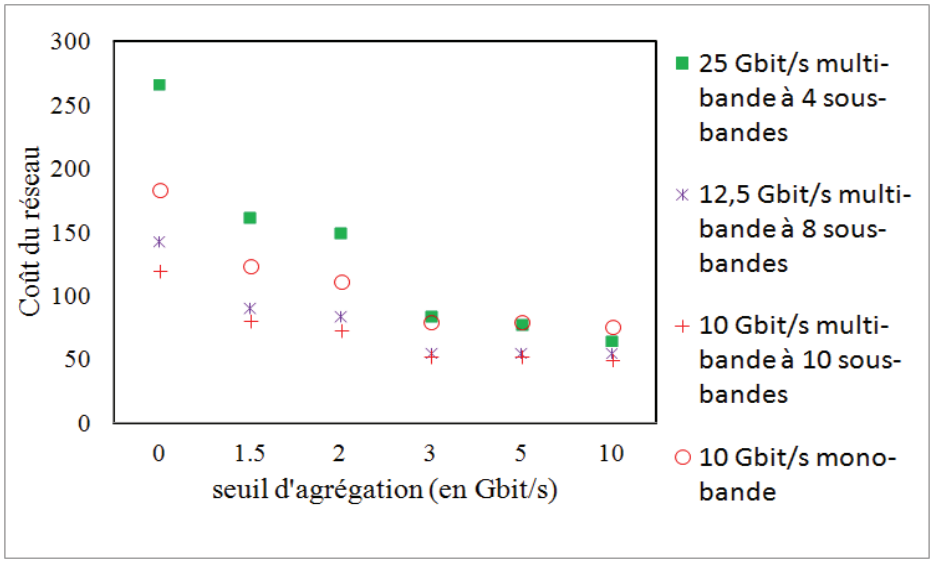


Figure V-5 Coût du réseau primaire pour les différentes architectures multi-bandes et l'architecture 10 Gbit/s WDM

Ce coût ne contient pas le coût des réseaux secondaire car il est le même pour les différents scenarios étudiés. Nous remarquons que quel que soit le seuil d'agrégation, le coût de la technologie multi-bande OFDM avec des sous-bandes de 10 Gbit/s est le moins élevé. Nous remarquons que le gain maximum obtenu par rapport au cas mono-bande 10 Gbit/s est dans le cas où le seuil d'agrégation est égal à 0 (une seule couche réseau). Ce gain maximum est de 35 % et plus le seuil d'agrégation augmente plus ce gain diminue. Le gain atteint un minimum de 15%. Le coût de la technologie multi-bande OFDM avec des sous-bandes de 25 Gbit/s est le plus important à des seuils d'agrégation faibles. Ceci s'explique par une occupation faible des sous-bandes par rapport aux autres scenarios de la technologie multi-bande OFDM. La Figure V-6 illustre le taux de remplissage des sous-bandes dans les différents scénarios multi-bandes OFDM en fonction des seuils d'agrégation.

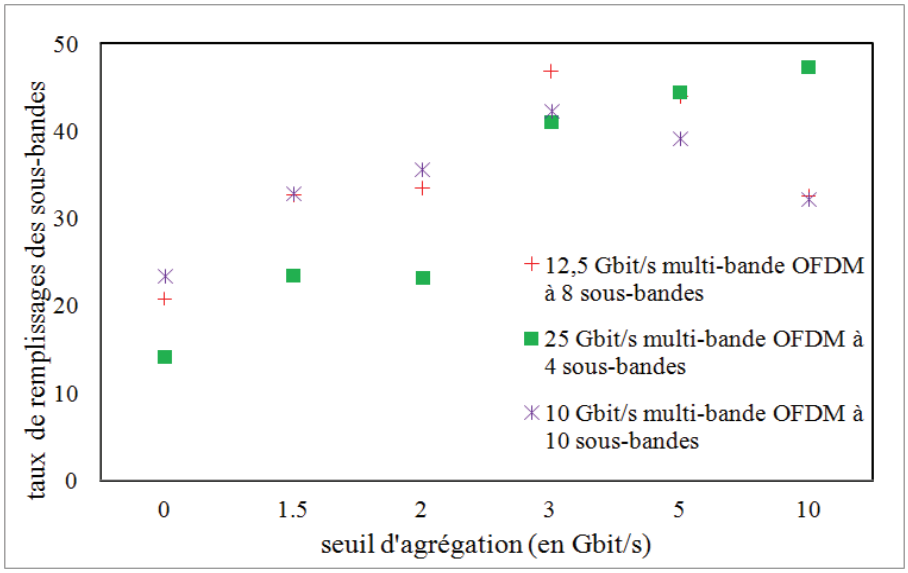


Figure V-6 Taux de remplissage des sous-bandes en fonction des seuils d'agrégation dans les différents scenarios des réseaux multi-bandes OFDM

En effet, le taux de remplissage des sous-bandes dans ce cas est entre 15 et 25 %. Pour le même trafic il serait plus judicieux d'utiliser des débits moins élevés pour les sous-bandes et par conséquent de déployer des slots de sous-bande moins coûteux. Nous remarquons que si le seuil d'agrégation augmente les coûts des différents scenarios diminuent. Pour le seuil d'agrégation à 10 Gbit/s, le scenario 10 Gbit/s WDM a le coût le plus élevé. Par rapport au scenario $C_{8\ \text{sous-bandes}}$ et $C_{10\ \text{sous-bandes}}$, cela s'explique par le fait que le coût d'un slot de sous-bandes 10 Gbit/s et d'un slot de sous-bande de 12,5 Gbit/s est inférieur au coût d'un transpondeur 10 Gbit/s conformément aux hypothèses considérées pour le modèle de coût (α=1 et μ=1). Concernant le scenario $C_{\text{référence}}$, bien que le prix d'un slot de sous-bande 25 Gbit/s est supérieur au prix d'un transpondeur 10 Gbit/s WDM, le coût du scenario $C_{\text{référence}}$ est moins important que le celui du scenario 10 Gbit/s WDM. Dans le cas du scénario $C_{\text{référence}}$ moins de transpondeurs sont utilisés pour transporter le trafic que dans le cas du scenario 10 Gbit/s WDM. La différence en nombre de transpondeurs compense la différence en coût. L'hypothèse considérée précédemment (μ=1) favorise le cas multi-bande OFDM optique. En effet prendre μ=1 revient à dire que le coût d'un transpondeur multi-bande OFDM 100 Gbit/s est le même qu'un transpondeur mono-bande 100 Gbit/s, ce qui est peu envisageable aujourd'hui vu la complexité des transpondeurs multi-bandes OFDM exposés dans le cadre du

projet 100G FLEX. Pour être plus équitable, en se basant sur le dimensionnement exposé dans la Figure V-4, nous déterminons pour quelle valeur de μ il est intéressant de déployer la technologie multi-bande OFDM dans les réseaux métropolitains en fonction des différents seuils d'agrégation.

La Figure V-7 illustre pour chaque seuil d'agrégation la valeur maximale que peut avoir le facteur μ pour que le déploiement de la technologie multi-bande OFDM devienne intéressant en termes de coût sur le réseau métropolitain. Nous rappelons que le coût concerne uniquement les transpondeurs déployés dans le réseau primaire. Nous remarquons que pour les scenarios $C_{8sous\text{-}bandes}$ et $C_{10sous\text{-}bandes}$ il existe une valeur de $\mu>1$ à n'importe quel seuil d'agrégation favorisant le déploiement de la technologie multi-bande OFDM dans le réseau métropolitain par rapport à la technologie 10 Gbit/s WDM. Pour le scenario $C_{référence}$ il ne serait intéressant de déployer la technologie multi-bande OFDM que pour un seuil d'agrégation égale à 10 Gbit/s. En effet la valeur du paramètre μ compte tenu de la technologie actuelle ne semble pas pouvoir être inférieur à 1. Car, dans ce cas le coût d'un transpondeur multi-bande OFDM 100 Gbit/s serait moins coûteux qu'un transpondeur mono-bande 100 Gbit/s ce qui parait peu réaliste aujourd'hui. D'après la courbe, pour les seuils d'agrégation inférieure à 10 Gbit/s la valeur de μ doit être inférieure à 1 pour que le scénario $C_{référence}$ soit intéressant à déployer sur le réseau métropolitain. Plusieurs conditions sur les valeurs des paramètres μ et α doivent être présentes pour encourager le déploiement de la technologie multi-bande sur le réseau métropolitain. Néanmoins la technologie multi-bande OFDM représente un grand avantage par rapport à la technologie 10 Gbit/s WDM. En effet elle permet de mettre dans un intervalle spectral réduit plusieurs sous-bandes et donc d'augmenter l'efficacité spectrale et ainsi apporter des réponses à l'augmentation du trafic. De plus, l'insertion progressive de slot permet de faire évoluer le réseau de façon continue ("scalability"). Si le trafic réseau est multiplié par 5 (prévision à 2020) nous atteindrons pour le cas du 10 Gbit/s WDM les capacités maximales de la fibre. C'est-à-dire que les 80 longueurs d'onde disponibles aujourd'hui seront plus capables de véhiculer le trafic réseau. Cela engendrera l'installation de nouvelles fibres et de nouveaux systèmes WDM. Ce problème n'est pas rencontré dans le cas multi-bande OFDM où nous avons plus la possibilité d'installer des slots de sous-bandes.

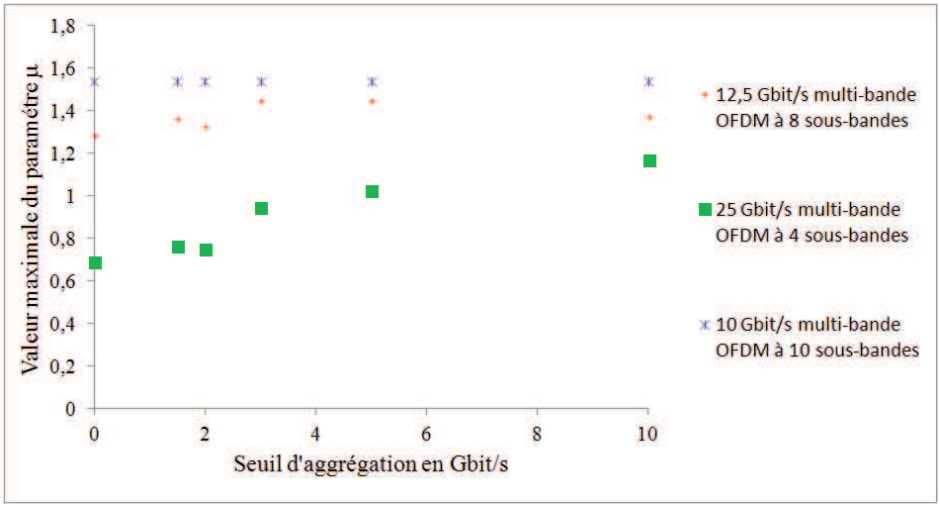


Figure V-7 Valeur maximale du facteur µ en fonction de chaque seuil d'agrégation pour le réseau primaire

V.4. Evaluation de la technologie multi-bande OFDM dans un réseau cœur

Nous proposons ici d'évaluer le coût de la technologie multi-bande OFDM dans le contexte d'un réseau cœur. Nous calculons le coût engendré par la technologie multi-bande OFDM par rapport à la technologie 100 Gbit/s mono-bande transparent (noté S_1 dans le chapitre III). Un algorithme de dimensionnement permettant de calculer le nombre de transpondeurs et le nombre de fonction de multiplexage de sous-bandes nécessaires pour établir toutes les demandes présentes dans la matrice de trafic est développé dans ce but. Concernant l'architecture mono-bande transparent, nous supposons que chaque demande de la matrice de trafic nécessite une paire de transpondeurs. Dans cette architecture, pour calculer le nombre de transpondeurs nécessaires pour satisfaire chaque demande, il faut déterminer si un chemin entre sa source et sa destination est possible. En effet ici nous n'avons pas besoin de tenir compte des problèmes de coloration et de régénération.

V.4.1. Algorithme de dimensionnement

L'objectif de cette étude n'est pas de comparer différents algorithmes de dimensionnement, mais de comparer le coût des différentes architectures. Nous avons donc

choisi d'utiliser un algorithme de calcul des plus courts chemins [60]. Le fonctionnement de l'algorithme de dimensionnement dans le cas multi-bandes OFDM est illustré dans la Figure V-8. D'abord, le plus court chemin est recherché entre les deux nœuds, source et destination, de la demande (problème de simple routage). Nous avons choisi le plus court chemin en termes de nœuds traversés et non en termes de distance kilométrique. Nous ne nous somme pas intéressés au phénomène de dégradation physique du signal ni à la portée du signal multi-bande OFDM. En effet dans [61], les auteurs ont montré que les performances en termes de portée et dégradation physique sont similaires entre les technologies multi-bande OFDM et mono-bande 100 Gbit/s. Pour cette raison la portée n'est pas considérée comme un critère différenciant et elle n'impacte pas le résultat de la comparaison. Une fois le plus court chemin calculé, nous commençons par affecter les sous-bandes à la demande qui a le plus de conflits avec les autres demandes de la matrice de trafic. L'algorithme commence donc par attribuer des sous-bandes à la demande qui partage le plus grand nombre de liens avec les autres demandes (problème d'affectation de longueur d'onde). Pour chaque demande, l'algorithme cherche d'abord les transpondeurs déjà installés entre la source et la destination pouvant satisfaire la demande. S'il existe un transpondeur pouvant véhiculer la demande, l'algorithme vérifie si une ou plusieurs sous-bandes que le transpondeur peut générer sont libres (en fonction des besoins de la demande) et continues sur les liens du chemin traversé par la demande. Si c'est le cas alors les sous-bandes sont affectées à la demande. Sinon l'algorithme refait le travail de nouveau pour les autres transpondeurs installés. S'il n'existe pas de transpondeur déjà installé pouvant satisfaire la demande, alors l'algorithme cherche les sous-bandes contigües et continues sur le chemin optique pouvant transporter la demande. La contrainte de contiguïté a été considérée ici car elle permet de réduire le nombre de transpondeurs utilisés.

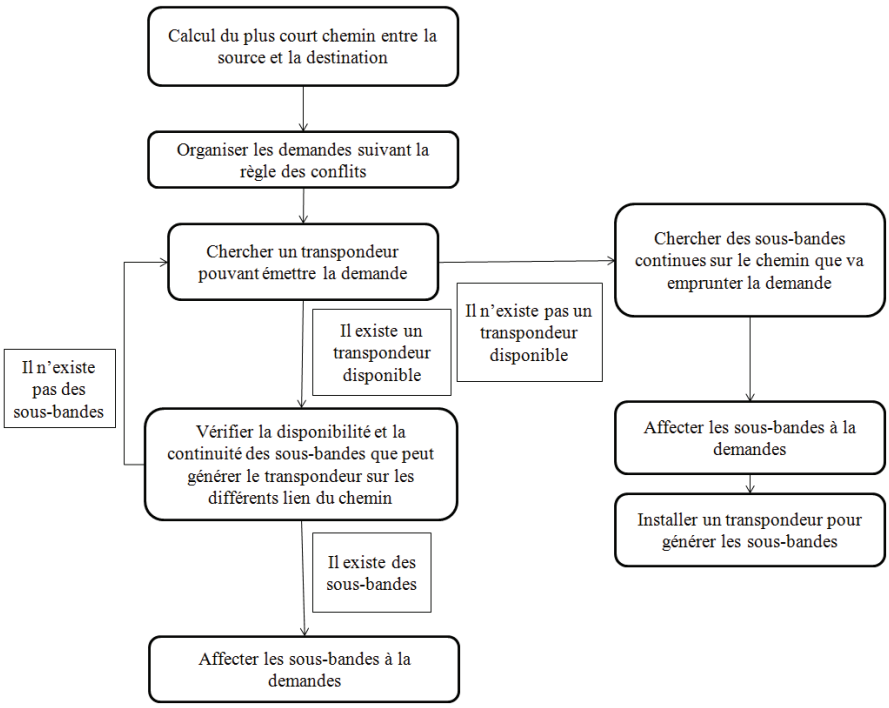
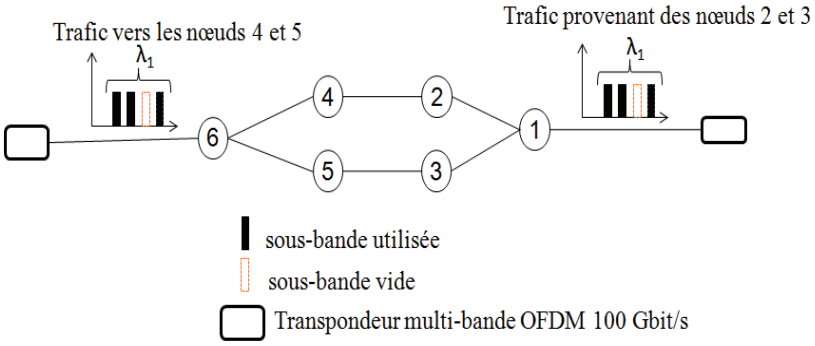


Figure V-8 Fonctionnement de l'algorithme de dimensionnement

Une paire de transpondeurs est par la suite installée à la source et à la destination. En se basant sur cet algorithme nous calculons le nombre de transpondeurs nécessaires pour transporter les différentes demandes. La Figure V-9 illustre le fonctionnement de cette étape de dimensionnement. Dans cet exemple, juste une partie du réseau NSFnet correspondant à 6 nœuds est considérée. Une partie du trafic circulant entre ces 6 nœuds a été dimensionnée. Selon la matrice du trafic exposé dans la Figure V-9, la demande à traiter est la demande du nœud 6 vers le nœud 1. Au niveau du nœud 6 il y a un transpondeur installé qui émet du trafic vers les nœuds 4 et 5. Au niveau de ce transpondeur, la sous-bande en trait discontinu orange n'est pas utilisée. Au niveau du nœud 1, il y a un transpondeur installé qui reçoit du trafic des nœuds 2 et 3. Au niveau de ce transpondeur, la sous-bande en trait discontinu orange n'est pas utilisée. La demande du nœud 6 vers le nœud 1 peut donc être émise et reçue par les transpondeurs déjà installés dans ces nœuds en utilisant la sous-bande $b_{1,4}$. Maintenant, l'algorithme vérifie sur chaque lien du chemin que va emprunter la demande si la sous-bande n'est pas utilisée par d'autres demandes. Si c'est le cas la sous-bande $b_{1,4}$ est attribuée à la demande entre le nœud 6 et le nœud 1. Sinon, l'algorithme cherche sur les différents liens du

chemin que va emprunter la demande une sous-bande continue pouvant transporter la demande et installe pour cette demande une paire de transpondeur au niveau des nœuds 1 et 6.



Trafic dimensionné		
S	D	Débit
6	4	50 Gbit/s
6	5	25 Gbit /s
2	1	50 Gbit/s
3	1	25 Gbit/s
Trafic à dimensionner		
S	D	Débit
6	1	25 Gbit/s

Figure V-9 Exemple de fonctionnement de l'algorithme de dimensionnement

V.4.2. Comparaison de la technologie multi-bande OFDM et la technologie mono-bande transparent sur le réseau cœur NSFNET

Le trafic à transporter dans le réseau est de 4,8 Tbit/s. Cette valeur est valeur estimée et basée sur des projections de trafic réaliste. Nous supposons que le débit moyen des différentes demandes est 52 Gbit/s. Nous supposons que tous les nœuds communiquent entre eux dans un sens unique. Au total, la matrice de trafic contient 91 demandes. Le scenario de sous-bandes considéré est le scenario $C_{\text{référence}}$, où chaque canal multi-bande est composé de 4 sous-bandes indépendantes. Dans un premier temps, les opérations de commutation de sous-bandes ne sont pas considérées dans le coût du réseau. Nous proposons d'abord de calculer une borne inférieure des nombres de transpondeurs. Pour ce faire, nous proposons de ne pas nous intéresser ni à la problématique de routage, ni à la problématique de coloration des demandes (affectation des sous-bandes à la demande). En effet, dans ce cas pour calculer le nombre de transpondeurs multi-bande OFDM 100 Gbit/s, il suffit de calculer au niveau de chaque nœud source et chaque nœud destination les sous-bandes générées et reçues. Par exemple si un nœud du réseau reçoit cinq sous-bandes indépendantes alors 2 transpondeurs seront installés au niveau de ce nœud. De la même manière si un nœud émet 5 sous-bandes, il utilisera 2

transpondeurs indépendamment de la direction prise par les sous-bandes et des liens que vont traverser les sous-bandes. Ceci permet de donner une borne inférieure pour le nombre de transpondeurs. Il se peut que cette borne soit inatteignable. Par exemple, dans le cas de la Figure V-9 si nous ne considérons pas le routage de sous-bandes, seulement quatre transpondeurs seront installés :

- Un transpondeur dans le nœud 6
- Un transpondeur au niveau du nœud 1
- Un transpondeur au niveau du nœud 2
- Un transpondeur au niveau du nœud 3

Pour déterminer le nombre de transpondeurs seulement une vue sur chaque nœud est considéré. Ainsi, nous avons une estimation de la borne inférieure théorique mais qui peut être non réalisable. Pour simplifier nous appelons cette borne inférieure multi-bande OFDM idéale Cette borne inférieur permet de donner une idée sur la performance des résultats fournis par notre algorithme de dimensionnement.

V.4.3. Résultats de dimensionnement

En

Tableau V-4 nous représentons les résultats obtenus pour le dimensionnement avec la matrice de trafic proposée. Nous ne considérons que le trafic non protégé pour les trois cas de figure. Le cas multi-bande OFDM utilise moins de transpondeurs 100Gbit/s que le cas mono-bande transparent.

Mono-bande transparent	Multi-bande OFDM avec notre algorithme de dimensionnement	Multi-bande OFDM idéal
182 transpondeurs	157 transpondeurs	130 transpondeurs

Tableau V-4 Nombre de transpondeurs utilisés pour transporter le trafic

Dans le cas multi-bande idéal, on obtient une valeur théorique de 30 % de transpondeurs en moins par rapport à la technologie mono-bande transparent alors que notre algorithme de dimensionnement nous permet d'obtenir 15% de transpondeurs en moins que le cas mono-bande transparent pour un trafic donné et une topologie donnée. Bien évidement ce résultat

peut varier avec le trafic et la topologie. Ce gain en nombre de transpondeurs peut s'expliquer par l'analyse suivante :

- En émission : un transpondeur multi-bande OFDM peut émettre plusieurs sous-bandes. Chacune des sous-bandes émises peut être affectée à une demande et peut être routée vers des directions différentes. Par contre dans le cas mono-bande transparent un transpondeur ne peut émettre qu'une seul demande indépendamment de son débit. La Figure V-10 illustre la différence de ce qui se passe en émission entre le cas mono-bande transparent et le cas multi-bande OFDM. Au niveau du nœud 6 pour émettre les demandes vers les nœuds 4 et 5 le cas mono-bande transparent a besoin de plus de transpondeurs (2 transpondeurs mono-bandes) que le cas multi-bande OFDM (1 transpondeur multi-bande) comme illustré dans la Figure V-10.

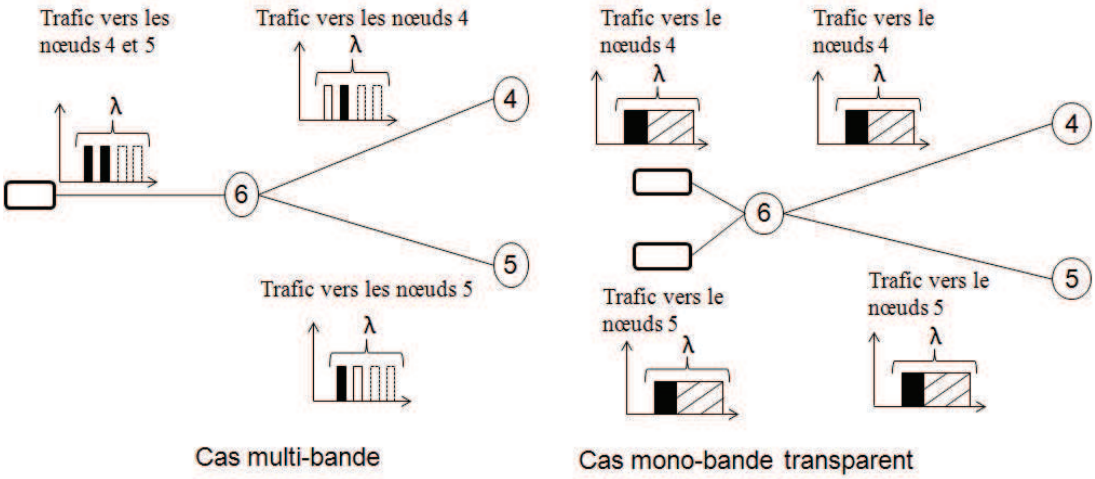


Figure V-10 Exemple de calcul du nombre de transpondeurs en émission dans le cas multi-bande OFDM et le cas mono-bande transparent

- En réception : un transpondeur multi-bande OFDM peut recevoir plusieurs sous-bandes. Les différentes sous-bandes reçues peuvent provenir de directions différentes et grâce à la fonction de commutation de sous-bandes elles sont agrégées au sein du même canal dans un nœud intermédiaire du chemin et réceptionnées par un unique transpondeur à la destination. Dans le cas mono-bande transparent il n'y a pas d'opérations d'agrégations et par conséquent chaque demande utilise un canal WDM indépendant. Pour chaque canal WDM, un transpondeur doit être installé dans le nœud

destination. La Figure V-11 illustre la différence de ce qui se passe en réception entre le cas mono-bande transparent et le cas multi-bande OFDM. En reprenant le même trafic provenant des nœuds 2 et 3 de la Figure V-9, nous remarquons qu'au niveau du nœud 1 pour recevoir les deux demandes provenant du nœud 2 et 3, la technologie mono-bande transparent a besoin de plus de transpondeurs (2 transpondeurs mono-bandes) que le cas multi-bande OFDM (1 transpondeur multi-bande).

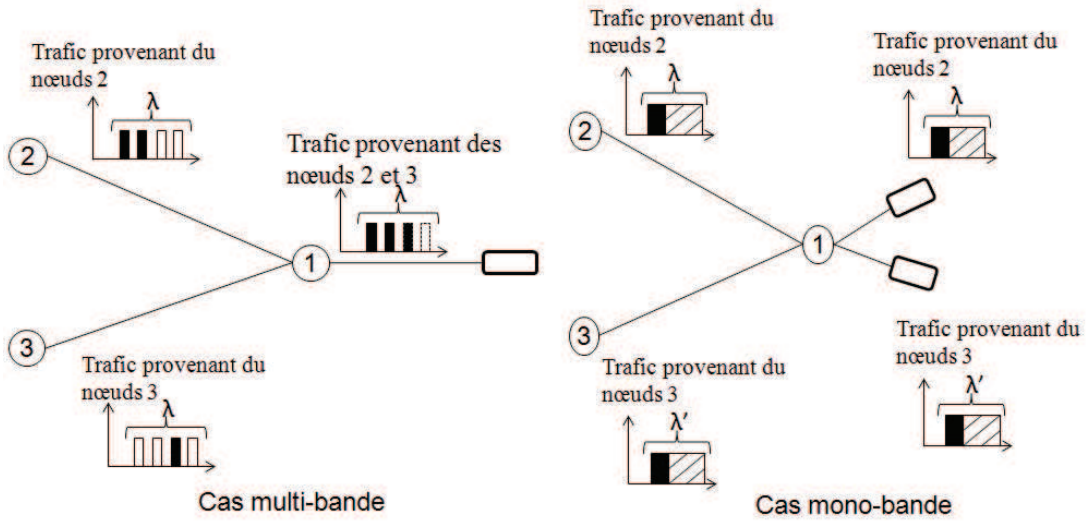


Figure V-11 Exemple de calcul du nombre de transpondeurs en réception dans le cas multi-bande OFDM et le cas mono-bande transparent

V.4.4. Calcul du coût du déploient de la technologie multi-bande OFDM sur le réseau NSFnet

Le coût $C_{\text{réseau multi-bande}}$ du déploiement de la technologie multi-bande OFDM sur le réseau cœur est donné par l'Équation V-7.

$$C_{réseau\ multi-bande} = N_{tr\ multi-bande} * C_{multi-bande} + C_{aggrégation\ des\ sous-bandes}$$

Équation V-7

$N_{\text{tr multi-bande}}$ est le nombre de transpondeurs à déployer sur le réseau et $C_{\text{agrégation des sous-bandes}}$ représente le coût des opérations d'agrégation/désagrégation effectuées au niveau des nœuds intermédiaires.

Le coût $C_{\text{réseau mono-bande}}$ du déploiement de la technologie mono-bande transparent 100 Gbit/s est donné par l'Équation V-8

$$C_{réseau\ mono-bande} = N_{tr\ mono-bande} * C_{100WDM} \qquad \textbf{Équation V-8}$$

$N_{\text{tr mono-bande}}$ représente le nombre de transpondeurs à déployer pour la technologie mono-bande WDM 100 Gbit/s.

En se basant sur ces équations, pour que le déploiement de la technologie multi-bande OFDM soit intéressant il faut que :

$$C_{réseau\ multi-bande} < C_{réseau\ mono-bande} \qquad \textbf{Équation V-9}$$

Par conséquent :

$$N_{tr\ multi-bande} * C_{multi-bande} + C_{aggrégation\ des\ sous-bandes} < N_{tr\ mono-bande} * C_{100WDM} \qquad \textbf{Équation V-10}$$

L'Équation V-2 et l'Équation V-9 nous permette d'avoir la condition sur la valeur du facteur μ .

$$\mu < \frac{N_{tr\ mono-bande} - \frac{C_{aggrégation\ des\ sous-bandes}}{C_{100WDM}}}{N_{tr\ multi-bande}} \qquad \textbf{Équation V-11}$$

V.4.4.1. Cas où le coût d'agrégation est nul

Nous ne considérons pas dans un premier temps le coût d'agrégation. L'Équation V-11 devient :

$$\mu < \frac{N_{tr\ mono-bande}}{N_{tr\ multi-bande}} \qquad \textbf{Équation V-12}$$

Ceci représente la condition sur le facteur de proportionnalité μ pour que le réseau multi-bande OFDM soit plus rentable en termes de coût que le réseau mono-bande transparent. En se basant sur le dimensionnement effectué dans la section V.4.3 nous déterminons les valeurs

limites que peut avoir le facteur μ pour un dimensionnement effectué avec notre algorithme de dimensionnement et pour la solution idéale.

	Multi-bande OFDM	Multi-bande OFDM idéale
μ	1,20	1,40

Tableau V-5 Valeur limite du paramètre μ

Le Tableau V-5 présente la valeur maximale que peut avoir le paramètre μ pour que le déploiement de la technologie multi-bande OFDM soit économiquement intéressant. L'algorithme de dimensionnement développé montre que le coût d'un transpondeur multi-bande OFDM 100 Gbit/s peut être au maximum 20% plus coûteux qu'un transpondeur mono-bande transparent par rapport à 40 % dans le cas multi-bande idéal, pour la topologie et le trafic donnés.

V.4.4.2. Cas où le coût d'agrégation est considéré

Ici le coût d'agrégation des sous-bandes est considéré. L'Équation V-13 exprime la condition sur le coût des opérations d'agrégation pour que le déploiement de la technologie multi-bande OFDM devienne intéressant.

$$C_{aggrégation\ des\ sous-bandes} < C_{ROADM} + C_{100WDM} * N_{tr\ mono-bande} - C_{multi-bande} * N_{tr\ multi-bande})$$

Équation V-13

Le coût d'agrégation doit être inférieur à la différence du coût du réseau mono-bande transparent et du coût des transpondeurs dans le réseau multi-bande OFDM. Dans notre étude le coût du réseau mono-bande transparent contient le coût des transpondeurs ainsi que le coût des ROADM à installer sur le réseau.

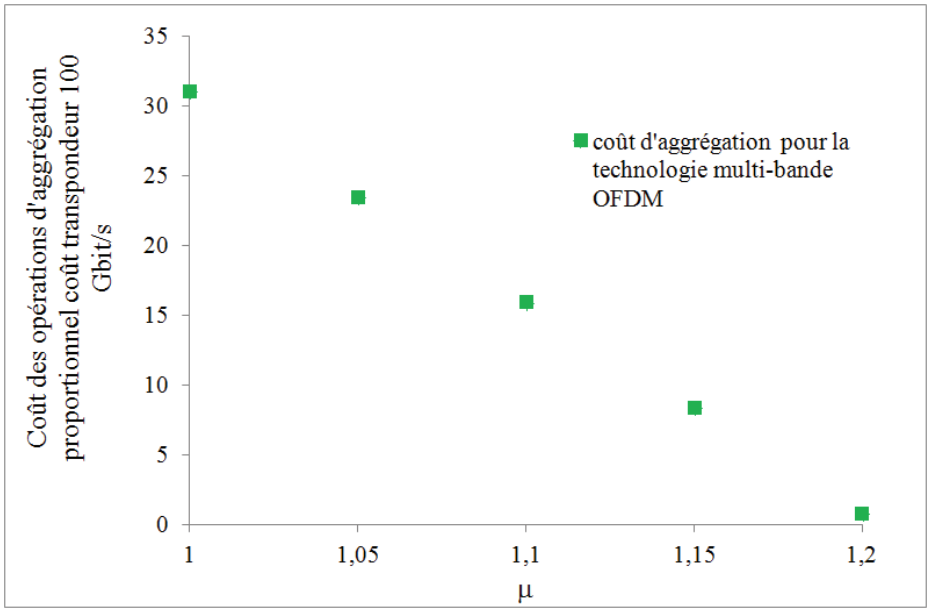


Figure V-12 Evolution des coûts d'agrégations dans les réseaux multi-bandes OFDM en fonction du paramètre μ

La Figure V-12 évalue le coût de l'agrégation dans les réseaux multi-bandes en fonction du paramètre μ. Plus μ est important moins la marge des coûts d'agrégation des sous-bandes est importante. Le coût d'agrégation diminue en fonction de l'augmentation du paramètre μ. Les valeurs de μ inférieures à 1 ne sont pas prise car elles représentent un cas où le transpondeur multi-bande OFDM devrait être moins cher que le transpondeur mono-bande. Ceci est peu probable aujourd'hui. Le coût des fonctions d'agrégation est donc inversement proportionnel au coût des transpondeurs multi-bandes OFDM. Si le coût des transpondeurs multi-bandes OFDM augmente par rapport au coût des transpondeurs mono-bandes opaques, il faut que le coût d'agrégation des sous-bandes diminue

V.4.5. Impact de la variation du nombre de sous-bandes sur le dimensionnement du réseau

Dans cette partie, nous étudions l'impact de l'augmentation du nombre de sous-bandes par canal WDM sur le résultat du dimensionnement du réseau. Pour ce faire deux scenarios sont considérés : l'utilisation dans un premier cas de transpondeurs multi-bande OFDM avec 8 sous-bandes et dans un second cas de transpondeurs multi-bande OFDM avec 4 sous-

bandes. Le Tableau V-6 reporte les différents résultats de dimensionnement en nombre de transpondeurs requis pour satisfaire l'ensemble des demandes générées avec la même matrice de trafic présentés dans le chapitre IV.4.2.

Mono-bande transparent	Multi-bandes OFDM, 4 sous-bandes	Multi-bande OFDM, 8 sous-bandes	Multi-bande OFDM, 4 sous-bandes, idéal	Multi-bande OFDM, 8 sous-bandes, idéal
182 transpondeurs	157 transpondeurs	151 transpondeurs	130 transpondeurs	119 transpondeurs

Tableau V-6 Impact de la variation du nombre de sous-bandes sur le dimensionnement des reseaux multi-bandes OFDM

Pour le réseau NSFnet et pour le trafic proposé, le fait d'augmenter le nombre de sous-bandes par canal WDM permet de réduire le nombre de transpondeurs requis. Ceci permet d'augmenter la valeur maximale que peut prendre le coefficient de proportionnalité μ entre le coût d'un transpondeur multi-bande OFDM et un transpondeur mono-bande transparent ou/et d'autoriser des fonctions d'agrégation/désagrégation de sous-bandes un peu plus coûteuses. Néanmoins et comme expliqué dans le chapitre III, augmenter le nombre de sous-bandes par canal WDM est contraint par les limites technologiques des fonctions de filtrage optique installées au niveau des nœuds d'agrégation.

V.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié le coût d'un réseau utilisant une technologie multi-bande OFDM par rapport à la technologie tendancielle. Nous avons démontré les conditions pour que la technologie multi-bande OFDM soit compétitive par rapport à la solution mono-bande pour un trafic donné et une topologie donnée. Nous avons fait l'étude sur deux types de réseau, à savoir un réseau métropolitain et un réseau cœur. Pour le réseau métropolitain, nous avons montré que le déploiement de la technologie multi-bande OFDM peut être avantageux sous certaines conditions du facteur μ qui représente le coût d'un transpondeur multi-bande OFDM 100 G par rapport à un transpondeur mono-bande transparent 100G. Nous avons démontré que plus le nombre de sous-bandes par canal WDM n'augmentent, plus le déploiement de la technologie multi-bande OFDM est intéressant. En effet les scenarios multi-bandes OFDM à 10 sous-bandes et 8 sous-bandes sont plus intéressants que le déploiement de l'architecture multi-bande à 4 sous-bandes par rapport à l'architecture 10 Gbit/s WDM. D'un autre côté, l'architecture des transpondeurs multi-bandes qui semble la plus adaptée au réseau métropolitain est plus flexible vis-à-vis de l'augmentation du trafic dans ce type de réseau que la technologie 10 Gbit/s WDM. Au niveau du réseau cœur, le déploiement de cette technologie peut aussi être intéressant. Pour le cas considéré, le déploiement de la technologie multi-bande OFDM réduit le nombre de transpondeurs à installer sur le réseau. Pour le trafic et la topologie considérée, l'algorithme de dimensionnement développé nous a permis d'obtenir un gain de 15% par rapport à la technologie mono-bande transparent. Ceci nous a permis de fixer les limites du coût d'un transpondeur multi-bande OFDM 100 Gbit/s par rapport au coût d'un transpondeur mono-bande transparent 100 Gbit/s. En effet nous avons montré que le coût d'un transpondeur multi-bande OFDM ne devait pas dépasser 21 % du coût d'un transpondeur mono-bande 100 Gbit/s. A noter toutefois que ces 21 % ne considère pas les coûts supplémentaires induits par l'opération d'agrégation des sous-bandes et qu'ils devront être modélisés par la suite pour affiner les résultats.

Chapitre VI. **Conclusion et perspectives**

VI.1. Conclusion

Cette thèse entre dans le cadre du projet FUI-100G FLEX. Ce projet vise à élaborer une solution de transmission optique permettant de répondre à l'augmentation du trafic dans les réseaux de transport optique.

Afin de s'adapter à l'augmentation des débits dans les réseaux, de nouvelles techniques de transmission flexibles doivent être mises en place. De nombreux travaux de recherche sont en cours pour apporter plus de flexibilité et de transparence dans les réseaux de transport optique futurs. En effet, le volume total de trafic augmente mais les affluents de trafic demeurent de l'ordre de quelques Gbit/s. Par conséquent le recours à des conversions optoélectroniques augmente. De nos jours, la possibilité de pouvoir faire de la commutation intra-lambda a du sens afin de réduire le recours à des conversions optoélectroniques utilisées aujourd'hui pour agréger du trafic. Cette étude a pour objet d'analyser l'intérêt au niveau du réseau de la technologie multi-bande OFDM par rapport à des scénarios tendanciels à savoir : la technologie mono-bande opaque et la technologie mono-bande transparent. Les réseaux mono-bandes transparents assurent la transparence pour le trafic en transit dans le réseau, en contrepartie ils ne permettent pas d'opérations d'agrégation de trafic dans le domaine optique. Ceci engendre une sous-utilisation des ressources réseaux, en effet chaque demande d'un nœud source vers un nœud destination utilise la totalité du canal WDM. Les réseaux mono-bandes opaques quant à eux, n'assurent pas la transparence et des convertisseurs optoélectroniques doivent être déployés dans chaque nœud du réseau. Par conséquent, dans chaque nœud même le trafic en transit est converti en électrique. Par contre, ces opération de conversions électriques permettent d'agréger/ désagréger du trafic et par conséquent permettent de mieux utiliser les ressources réseaux Contrairement aux architectures mono-bande, la technologie multi-bande OFDM repose sur un découpage en sous-bandes des canaux WDM. Les formes rectangulaires de ces sous-bandes facilitent leurs commutations au niveau des nœuds du réseau par simple filtre optique. Le filtrage optique représente le point le plus important pour la mise en place de la technologie de la commutation de sous-bandes. Cette technique consiste à commuter une ou plusieurs sous-bandes d'un canal WDM multi-bande à un autre sans recours à des conversions optoélectroniques. Ceci permet de faire de l'agrégation /désagrégation intra-canal du trafic d'une façon transparente.

Mes travaux ont visé à déterminer sous quelles conditions le déploiement de la technologie multi-bande OFDM est intéressant. Pour cela nous avons conduit une étude technique sur la technologie de transmission multi-bande OFDM afin de déterminer les atouts qu'elle pouvait apporter pour offrir plus de flexibilité dans les réseaux de transport optique. Nous avons conçu et développé des outils permettant de comparer la technologie multi-bande OFDM aux scenarios tendanciels. Nous avons développé et présenté dans cette thèse des simulateurs spécifiques aux architectures mono-bande transparent, mono-bande opaque et multi-bande OFDM. A partir de ces simulateurs, nous avons mené des études comparatives sur les performances relatives de ces architectures en termes de blocage. Au cours de ces études comparatives, nous avons identifié l'impact d'un certain nombre de paramètres tels le nombre de sous-bandes par canal WDM où la taille des filtres optiques sur les performances de l'architecture multi-bande OFDM. En plus de ces études de performances en termes de blocage, nous avons présenté dans cette thèse une étude de dimensionnement de la technologie multi-bande OFDM sur un réseau cœur et un réseau métropolitain en se basant sur un trafic réaliste de l'opérateur Orange.

.Les comparaisons de performances en termes de blocage ont été faites en considérant la topologie de réseau NSFnet, souvent utilisée dans des études similaires. Pour la technologie multi-bande, nous avons considéré des canaux multi-bande OFDM composés de 4 sous-bandes indépendantes. En premier temps, nous avons conclu qu'en termes de performances la technologie multi-bandes OFDM est un compromis entre la technologie mono-bande opaque et mono-bande transparent.

- Elle est plus performante que la technologie mono-bande transparent car elle permet d'accéder à des granularités plus fines.
- Elle est moins performante que la technologie mono-bande opaque car elle accède à des granularités plus importantes.

Nous avons dans un deuxième temps déterminé les causes de blocage dans les réseaux multi-bandes OFDM. Nous avons conclu que le blocage est majoritairement dû à deux phénomènes, si les phénomènes de dégradation physique du signal ne sont pas considérés :

- Absence de ressources nécessaires sur l'ensemble des liens constituants le chemin optique que va emprunter une demande.

– Les ressources sont disponibles sur chaque lien du chemin optique, mais ces ressources ne sont pas continues.

En séparant les sources de blocage, nous constatons que le blocage est dû principalement à la contrainte de continuité des sous-bandes. Afin de réduire ce blocage, nous avons introduit dans le réseau des convertisseurs de longueur d'onde capables de modifier la longueur d'onde du canal WDM ou de la sous-bande (c'est-à-dire sa position spectrale dans le canal WDM). Nous constatons que cela n'a pas un impact important sur les performances totales (quel que soit la demande) du réseau, par contre ça permet de favoriser les demandes qui ont des chemins de plus de 1 saut par rapport aux demandes à un seul saut.

Afin de voir l'impact de la finesse de granularité dans les réseaux multi-bandes OFDM, nous avons étudié les performances en termes de blocage de ces réseaux en augmentant le nombre de sous-bandes arbitrairement à 10 sous-bandes. Nous constatons que cela améliore considérablement (36 % en moyenne) les performances en termes de blocage. Néanmoins, augmenter le nombre de sous-bandes par canal WDM reste soumis à des contraintes techniques. Ces contraintes techniques concernent principalement le filtrage optique. En effet plus le nombre de sous-bande augmente, plus la largeur spectrale des sous-bandes diminuent. Ce qui nécessite des filtres de plus en plus fins. Or à ce jour, la largeur spectrale minimale des filtres proposés dans le cadre du projet 100G FLEX est de 4 GHz. Le nombre maximum de sous-bandes par canal WDM est limité à 7 sous-bandes.

Concernant l'étude de dimensionnement, nous avons défini un modèle de coût. Nous n'avons pas tenu compte des phénomènes de propagation liés à la transmission du signal dans la fibre car, d'après des études récentes [34], ceux-ci semblent être identiques dans le cas de la technologie multi-bande OFDM 100 Gbit/s et QPSK 100 Gbit/s utilisée dans les réseaux mono-bandes transparents. Nous calculons pour chaque type d'architecture le nombre de transpondeurs nécessaires pour véhiculer le trafic. Nous avons considéré une topologie de réseau métropolitain et une topologie de réseau cœur. En ce qui concerne le réseau métropolitain, nous avons montré que plus le nombre de sous-bandes par canal multi-bande augmente, plus le déploiement de la technologie multi-bande OFDM est intéressant. D'autre part, la technologie multi-bande OFDM dans les réseaux métropolitains offre plus de possibilité vis-à-vis de l'augmentation du trafic que la technologie mono-bande. En effet la densité spectrale réduite des canaux WDM, grâce à la modulation OFDM, permet d'avoir un

nombre plus important de canaux pouvant transporter du trafic que dans le cas mono-bande. Au niveau du réseau cœur, nous avons développé un outil permettant de calculer le nombre de transpondeurs multi-bandes nécessaires pour générer le trafic réseau considéré. Un dimensionnement du réseau NSFnet a été proposé. Nous avons démontré que pour un trafic donné dans le cas de la technologie multi-bande OFDM à 4 sous-bandes 15% de transpondeurs en moins sont utilisés que dans le cas mono-bande transparent. L'intérêt des réseaux multi-bandes OFDM dépendra donc du coût des opérations d'agrégation/désagrégation des sous-bandes. Ceci ne doit pas dépasser l'économie gagnée par les transpondeurs.

Pour résumer, nous avons montré que la technologie multi-bande OFDM offre une alternative intéressante aux solutions mono-bandes. Elle permet d'augmenter la capacité des fibres tout en offrant une granularité "transparente" plus fine que le débit du canal WDM. A mon avis, la technologie multi-bande OFDM est une technologie qui a du potentielle par rapport aux technologies utilisées aujourd'hui. Je pense qu'à long terme son déploiement sera intéressant dans les réseaux de transports optiques.

VI.2. Perspectives

Dans des travaux futurs, nos perspectives d'études pourraient être les suivantes :

– Une étude approfondie sur l'impact du routage : Dans nos simulations nous avons considéré un routage de plus court chemin en nombre de sauts. Pour chaque demande, seulement le premier plus court chemin en nombre de sauts est considéré. L'admission des demandes dépend donc seulement de l'état des ressources sur ce premier plus court chemin. Afin de pousser l'étude, nous pouvons considérer les *n* plus courts chemins. Si sur le premier plus court chemin, pour une architecture donnée (qu'elle soit mono-bande ou multi-bande) la demande ne peut pas être établie, le simulateur calcule le deuxième plus cout chemin et vérifie sur ce dernier la disponibilité des ressources. Cette itération peut se faire jusqu'à une valeur de *n* à définir. La valeur de *n* dépendra des contraintes liées à la portée des signaux optiques et la longueur des chemins.

– Toutes les techniques de routage et d'agrégation de demandes méritent d'être étendues et validées dans le cadre d'un réseau optique avec des contraintes sur la qualité de la transmission (QoT). Dans ce cas, les algorithmes de routage des demandes doivent prendre en compte la dégradation du signal optique due à la traversée des divers équipements installés le long du chemin optique. Cela a pour but de minimiser le taux de rejet des demandes dû à une mauvaise qualité du signal à la réception.

– Une étude sur l'impact du principe du Multi-Path (chemin multiple) [62] [63] sur les performances des réseaux multi-bandes OFDM : Dans le cas de la technologie multi-bande OFDM, une demande peut être transmise en fonction de son débit sur 1 ou plusieurs sous-bandes. La demande est bloquée si, sur le chemin optique qu'elle doit emprunter, il n'existe pas suffisamment de sous-bandes permettant de satisfaire la demande. Une solution à ce blocage serait de chercher des sous-bandes disponibles sur différents chemins et, de ce fait, transporter la demande sur plusieurs chemins différents. Ceci peut améliorer les performances de la technologie multi-bande OFDM mais nécessite une resynchronisation pour compenser la différence entre les temps d'arrivée des sous bandes. Il sera donc probablement nécessaire d'ajouter une contrainte sur l'écart de temps de propagation maximum acceptable entre les différents chemins.

– Une étude approfondie sur les flexibilités de la technologie multi-bande OFDM : La technique multi-bande OFDM offre aussi la flexibilité de s'adapter soit aux débits des demandes et soit aux conditions physiques de transmission comme illustré dans le chapitre III. Par exemple le compromis qui consisterait, pour un chemin optique donné, soit à augmenter son étendue, soit à augmenter son débit Il est intéressant de prendre en compte cette flexibilité afin de voir son impact sur les performances et le dimensionnement du réseau.

– Améliorer la sélectivité des filtres permet d'avoir plus de sous-bandes par canal WDM avec une granularité plus fine. Ceci augmentera d'une part les performances des réseaux multi-bandes et réduira le nombre de transpondeurs à déployer sur le réseau. Il est intéressant de maintenir une veille technologique sur ces composants d'anticiper sur leur évolution et estimer leur impact sur le réseau.

– Une étude énergétique [64]: Une fois les différents équipements de la technologie multi-bande OFDM définis (commutateur de sous-bande, transpondeur), il serait intéressant de voir l'impact de la technologie multi-bande OFDM sur la consommation électrique du réseau en utilisant en particulier tous les mécanismes de flexibilité qu'elle offre.

– Nous pourrons inclure le schéma de protection [65] [66] dans notre étude des réseaux optiques pour la technologie multi-bande OFDM. En effet nous pouvons envisager l'utilisation des sous-bandes déjà installées dans les nœuds et non utilisées par des demandes pour la protection. Ceci peut être une alternative aux schémas de protection existants qui nécessitent l'installation de systèmes WDM séparés. Ceci permettra de réduire le coût de la protection dans les réseaux optiques.

Référence

[1] P. Gavignet, N. Brochier, E. Le rouzic et B. Arzur, «Future Optical Core Networks for Novel Applications,» *ECOC,* 2011.

[2] S. Su, J. Wang et X. Li, *Study of Bandwidth Consumption in P2P VoD System,* Beijing, China, 2010.

[3] «http://www.cisco.com,» 2010. [En ligne].

[4] A. Morea et I. Boyer, «Availability of Translucent Networks Based on WSS Nodes, Comparison with Opaque Networks,» *ICTON,* 2006.

[5] H. Zhao, Z. Fang, E. Marin et J. Meunier, «Configurable wavelength-selective switch based on fiber grating and fiber loop mirror,» *Photonics Technology Letters, IEEE,* vol. 12, n°110, pp. 1343-1345 , 2000.

[6] C. Lin, Broadband Optical Access Networks and Fiber-to-the-Home, Wiley, 2006.

[7] A. STAVDAS, Core and Metro Networks, Wiley, 2010.

[8] R. Ramaswami, N. Sivarajan et H. Sasaki, Optical Networks, Morgan KAUFMANN, 2011.

[9] M. Yoshida et H. Tanaka, «The characteristics of WDM systems with hybrid AGC EDFA in the photonics network,» chez *OFC*, Itami, Japan , 2002.

[10] W. T. Anderson, «The monet project a final report,» *OFC,* 2000.

[11] S. Mechels, L. Muller , G. D. Morley et D. Tillett, «1D MEMs-Based Wavelength Switching Subsystem,» *IEEE Communication Magazin,* vol. 11, n° 13, pp. 88-94, 2003.

[12] A. Morea et J. Poirrier, «A critical analysis of the possible cost savings of

translucent networks,» *Proccedings IEEE DRCN05,* 2005..

[13] R. Ramaswarni et K. sivarajan, «Optical Networks - A Practical Perspective,Second Edition,» *Morgan Kaufmann,* 1998.

[14] W. V. Heddeghem, W. Van, M. Groote, W. Vereecken, D. Colle, M. Pickavet et P. Demeester, «Energyefficiency in telecommunications networks: Link-by-link versus end-to-end grooming,» *ONDM,* 2010.

[15] J. C. Livas, «Optical transmission evolution: From digital to analog to? Network tradeoffs between optical transparency and reduced regeneration cost,» *Journal of Lightwave Technology,* vol. 23, n° 11, pp. 219-224, 2005.

[16] G. Randy, K. N. Kumaran, M. Debasis, J. N. Carl et I. Saniee, «Selective transparency in resilient optical networks,» *MILCOM,* vol. 1, pp. 72-74, 2002.

[17] S. Jansen, I. Morita et H. Tanaka, «10*121.9-Gb/s PDM-OFDM Tansmission with 2-b/s/Hz Spectral Efficiency over 1,000 km of SSMF,» *OFC/NFOEC,* 2008.

[18] Q. Zhang et J. Jue, «Dynamic traffic grooming in optical burst-switched networks,» *Journal of Lightwave Technology,* vol. 23, n° 110, pp. 3167-3177 , 2005.

[19] A. Watanabe, W. Imajuku, Y. Tsukishima, B. Kozicki, H. Takara et M. Jinno, «Bandwidth Squeezed Restoration in Spectrum-Sliced Elastic Optical Path Networks (SLICE),» *Journal of Optical Communications and Networking,* vol. 3, n° 13, pp. 223-233, 2011.

[20] H. Takara, Y. Tsukishima, T. Yoshimatsu, T. Kobayashi, K. Yonenaga et M. Jinno, «Optical Path Aggregation for 1-Tb/s Transmission in Spectrum-Sliced Elastic Optical Path Network,» *Photonics Technology Letters,* vol. 22, n° 117, pp. 1315-1317, 2010.

[21] M. Yoo et C. Qiao, «A novel switching paradigm for buffer-less WDM networks,» *OFC/IOOC,* vol. 3, pp. 177-179, 1999.

[22] P. Pavon-Marino et F. Neri, «On the Myths of Optical Burst Switching,» *IEEE TRANSACTIONS ON COMMUNICATIONS,* vol. 59, n° 19, pp. 2574-2584, 2011.

[23] B. Kozicki, H. Takara, Y. Tsukishima, T. Yoshimatsu, K. Yonenaga et M. Jinno, «Experimental demonstration of spectrum-sliced elastic optical path network (SLICE),» *Optics Express,* vol. 18, n° 121, pp. 22105-22118, 2010.

[24] H. Takara, B. Kozicki, Y. Tsukishima, T. Yoshimatsu, T. Kobayashi, Y. Miyamoto, K. Yonenaga, A. Takada, O. Ishida, S. Matsuoka et M. Jinno, «Demonstration of novel spectrum-efficient elastic optical path network with per-channel variable capacity of 40 Gb/s to over 400 Gb/s,» *ECOC 2008,* 2008.

[25] S. Bigo, G. Bellotti et O. Rival, «After Today's 100Gbit/s transmission in optical networks,» *ECOC,* 2010.

[26] A. Deore, O. Turkcu, S. Ahuja, S. J. Hand et S. Melle, «Total Cost of Ownership of WDM and Switching Architectures for Next-Generation 100Gb/s Networks,» *communication magazine,* vol. 50, n° 111, pp. 179-187, 2012.

[27] J. Renaudier, G. Charlet, O. BertrandPardo, H. Mardoyan, P. Tran, M. Salsi et S. Bigo, «"Experimental analysis of 100Gb/s coherent PDM-QPSK long-haul transmission under constraints of typical terrestrial networks",» *ECOC,* September 2008.

[28] M. Keskinoz, G. O et M. E, «"Cross-layer enhanced time scheduling for multi-band OFDM UWB networks",» *Journal on Wireless Networks,* vol. 16, n° 1 Issue. 3, pp. 863-873, April 2010.

[29] M. R. D. Rodrigues et J. J. O'Reilly, «"Assessment of the performance of radio over fibre based wireless networks employing OFDM signaling,",» *Proceedings of*

the London Communications Symposium, pp. pp. 47-50, 1999.

[30] B. Dixon, R. Pollard et S. Iezekeil, «Orthogonal frequency division multiplexing in wireless communication systems with multimode fibre feeds,» *RAWCOM,* 2001.

[31] S. Jansen, B. Spinnler, I. Morita, S. Randel et H. Tanaka, «100GbE: QPSK versus OFDM,» *Optical Fiber Technology,* vol. 15, n° 15, pp. 407-413, 2009.

[32] S. Jansen, I. Morita et H. Tanaka, «"10-Gb/s OFDM with conventional DFB lasers,",» *European Conference on Optical Communications (ECOC),* 2007.

[33] R. P. R. van Nee, OFDM for Wireless Multimedia Communications, Artech House Publishers, 2000.

[34] J. Karaki, E. Pincemin, Y. Jaouen et R. L. Bidan, «Frequency Offset Estimation in a Polarization-Multiplexed Coherent OFDM system stressed by chromatic dispersion and PMD,» *Cleo,* 2010.

[35] Y. OPTICS, «XTA-50 Filters(standard, ultrafine, O-band) Automatic Wavelength and Bandwidth Selection».

[36] R. Inohara, K. Nishimura et M. Usami, «Mitigation of Signal Degradation due to Cascaded Filters by Optical 3R Regeneration at 40Gb/s,» *ECOC,* vol. 3, 2005.

[37] S. BLOUZA, J. KARAKI et E. Pincemain, «Procédé et dispositif de filtrage optique coupe-bande et dispositif d'insertion/extraction de sous-bande optique multiplexée en fréquence dans un signal optique». France Brevet 11 51082, février 2011.

[38] S. BLOUZA, J. K. E. L. ROUZIC, B. COUSIN, N. BROCHIER et E. PINCEMIN, «Multi-band OFDM for optical networking,» *EUROCON,* 2011.

[39] A. Klekamp, O. Rival, A. Morea, R. Dischler et F. Buchali, «Transparent WDM network with bitrate tunable optical OFDM transponders,» *Optical Fiber*

Communication, 2010.

[40] L. Noirie, «Waveband Switching in Multi-Granularity Optical Networks,» *OptoElectronics and Communications Conference OECC,* 2002.

[41] A. Todimala et B. Ramamurthy, «Algorithms for Intermediate Waveband Switching in Optical WDM Mesh Networks,» *High-Speed Networks Workshop,* 2007.

[42] Y. Wang et X. Cao, «Multi-Granular Waveband Assignment and Protection in WDM Networks,» *JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY,* vol. 28, n° 113, pp. 2004-2013, July 2010.

[43] «Multi-Granular Waveband Assignment and Protection in WDM Networks,» *JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY,* vol. 28, n° 113, pp. 2004-2013, 2010.

[44] H. Waldman et D. R. Campelo, «Resource Blocking and Usage in Optical Networks,» *ICTON,* 2007.

[45] Y. Pointurier, M. Brandt-Pearce et S. Subramaniam, «Analysis of Blocking Probability in Noise- and Cross-Talk-Impaired All-Optical Networks,» *Journal of Optical Communications and Networking,* vol. 1, n° 16, pp. 543-554, 2009.

[46] O. Community, 2012. [En ligne]. Available: http://www.omnetpp.org/.

[47] E. Pincemin et A. Tan, «Performance Comparison of Duobinary Formats for 40-Gb/s and Mixed 10/40-Gb/s Long-Haul WDM Transmission on SSMF and LEAF Fibers,» *JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY,* vol. 27, n° 14, pp. 396-408, February 2010.

[48] A. SOMANI, Survivability and Traffic Grooming in WDM Optical Networks, CAMBRIDGE: CAMBRIDGE, 2006.

[49] S. Ahuja, M. M. Krunz et S. Ramasubramanian, «Wavelength Assignment in Optical Networks with Imprecise Network State Information,» *BROADNETS,* 2006.

[50] S. AL ZAHR, M. GAGNAIRE, N. PUECH et M. KOUBAA, «Physical Layer Impairments in WDM Core Networks: a Comparison between a North-American Backbone and a Pan-European Backbone,» *Broadband Networks,* 2005.

[51] E. Dijkstra, «A note on two problems in connection with graphs,» *Numerische,* vol. 1, pp. 269-271, 1959.

[52] J. KARAKI, E. PINCEMIN, T. GUILLOSSOU, Y. JAOUEN et R. L. BIDAN, «Approche multi-bandes pour la transmission 100 Gbps de signaux OFDM multiplexés en polarisation,» *journées nationales d'optique guidée JNOG,* 2011.

[53] J. EASTON et H. McCOLL, «http://www.stats.gla.ac.uk,» Statistics Glossary. [En ligne].

[54] S. J. B. Yoo, «Wavelength conversion technologies for WDM network applications,» *Journal of Lightwave Technology,* vol. 14, n° 16, pp. 955-966, 1996.

[55] H. Zangt, J. Juet et B. Mukherjeet, «A Review of Routing and Wavelength Assignement Approaches for Wavelength-Routed Optical WDM Networks,» Aout 1999.

[56] R. Werner, C. Hebebrand et A. Ali, «Digital signal processing in high-speed optical communications,» *LEOS,* 2008.

[57] E. L. Rouzic, N. Brochier, S. Blouza, G. Froc, C. Mangin, M. Morvan, P. Gravey, J. Jauffrit, M. Joindot et M. v. d. Keur, «"On the Interest of Multi-Band OFDM in backhaul networks,» *European Conference on Optical Communication,* 2012.

[58] A. Saleh et J. Simmons, «Evolution toward the next-generation core optical

network,» *Journal of lightwave Technology,* vol. 24, n° 19, pp. 3303-3321, 2006.

[59] J. Karaki et E. pincemain, «Multi-Band OFDM versus Single-Carrier DP-QPSK for 100 Gbps Long-Haul WDM Transmission,» *Sppcom,* 2012.

[60] «A note on two problems in connection with graphs,» *Numerische Mathematik,* vol. 1, n° 12.3.2 , 4.5.3 , 5.9.2, pp. 269-271, 1959.

[61] J. Karaki, E. Pincemin, Y. Jaouen et R. Le Bidan, «Frequency Offset Estimation in a Polarization-Multiplexed Coherent OFDM system stressed by chromatic dispersion and PMD,» *CLEO,* 2012.

[62] L. Padhi, S. Kartikeya, K. Sivalingam et S. Sai, «Multi-path routing in optical WDM networks: Even versus uneven split bandwidth allocation,» *SPCOM ,* 2010.

[63] L. Dongmei, F. Shouqiang et J. Yue-feng, «Multi-path Transport Scheme for Optical Grid,» *COIN-NGNCON,* 2006.

[64] F. Zhou, M. Molnar, B. Cousin et G. Simon, «Power-optimal Design of Multi-cast Light-trees in WDM Networks,» *IEEE Communications Letters,* vol. 15, n° 111, pp. 1240-1242, 2001.

[65] G. Maier, A. Patavina, S. Patre et M. Martinelli, «Optical network survivability : protection techniques in the WDM Layer,» *Photonic Network Communications,* pp. 251-269, 2002.

[66] H. Drid, B. Cousin, M. Molnar et S. Lahoud, «A Survey of Survivability in Multi-Domain Optical Networks,» *Computer Comminications,* vol. 3, n° 18, pp. 1005-1012, 2010.

Liste des publications

Articles

E. Le Rouzic, N. Brochier, S. Blouza, G. Froc, C. Mangin, M. Morvan, P. Gravey, J. Jauffrit, M. Joindot, M. van der Keur, ”On the Interest of Multi-Band OFDM in backhaul networks”, 38th European Conference on Optical Communication (ECOC), 2012

S. Blouza, E. Le Rouzic, N. Brochier, B. Cousin, ” Optical Multi-band OFDM Switching Technology ”, 17th European Conference Network and Optical Communications (NOC), 20-22 June 2012

S. Blouza, J. Karaki, N. Brochier, E. Le Rouzic, E. Pincemin , B. Cousin, “Multi-band OFDM for optical networking”, International Conference on Computer as a Tool (EUROCON), IEEE, 27-29 April 2011

Esther Le Rouzic, Nicolas Brochier, Sofiene Blouza, and Erwan Pincemin “Optical Networking Based on Multi-Band Optical OFDM at Ultra-High Bit Rates”, 2ème colloque Réseaux à large bande et Internet rapide, Beyrouth, Liban. (2011)

Brevet déposé à l’INPI le 10 février 2011

S. Blouza, J. Karaki, E. Pincemin, Brevet numéro 11 51082, “Procédé et dispositif de filtrage optique coupe-bande et dispositif d’insertion/extraction de sous-bande optique multiplexée en fréquence dans un signal optique”