

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE  
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À  
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION  
DE LA MAÎTRISE EN GÉNIE ÉLECTRIQUE  
M.Ing.

PAR  
ARCHAMBAULT, Émile

PLATEFORME DE CONCEPTION ET DE SIMULATION  
DES RÉSEAUX OPTIQUES SANS FILTRE

MONTRÉAL, LE 5 SEPTEMBRE 2008

© Archambault Émile, 2008

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

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

M. François Gagnon, codirecteur  
Département de génie électrique à l'École de technologie supérieure

M. François Coallier, président du jury  
Département de génie logiciel à l'École de technologie supérieure

M. Éric Bernier, membre du jury

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

LE 3 SEPTEMBRE 2008

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

## **REMERCIEMENTS**

Je tiens à remercier ma directrice, Christine Tremblay, pour m'avoir offert la possibilité de travailler sur le projet sans filtre et pour m'avoir encadré pendant la durée de ma maîtrise. Je tiens également à remercier François Gagnon, mon codirecteur, pour son implication et ses conseils tout au long de ma maîtrise.

Je remercie aussi Benoît Châtelain, Daniel O'Brien, Jean-Philippe Savoie, Philippe Blanchard, Simone Ngassa et Guillaume Mantelet, mes collègues de l'équipe sans filtre, pour tout l'aide et le support qu'ils m'ont apportés durant mes années de maîtrise.

Finalement, j'aimerais remercier Éric Bernier et Michel Bélanger, collaborateurs au projet des réseaux optiques sans filtre chez Nortel, pour leur implication dans l'élaboration de mes travaux de recherche.

# **PLATEFORME DE CONCEPTION ET DE SIMULATION DES RÉSEAUX OPTIQUES SANS FILTRE**

ARCHAMBAULT, Émile

## **RÉSUMÉ**

Des avancées technologiques récentes ont permis l’élaboration de nouvelles architectures de réseaux optiques. En effet, des réseaux optiques sans filtre, composés uniquement de diviseurs optiques passifs placés à l’intérieur des noeuds, sont maintenant envisagés pour offrir une alternative économique et fiable aux réseaux optiques longue distance traditionnels. Dans ce mémoire, une plateforme de conception et de simulation de ces réseaux optiques sans filtre est proposée afin d’étudier les propriétés de cette nouvelle technologie sur des réseaux de référence. De plus, comme le nombre de longueurs d’onde dans les réseaux optiques sans filtre est souvent supérieur à celui des réseaux traditionnels, un module de placement des bloqueurs de longueurs d’onde servant à optimiser le positionnement de cette composante est aussi présenté dans ce mémoire. Finalement, les résultats obtenus avec la plateforme de conception et de simulation des réseaux optiques sont exposés, en plus d’un certain nombre d’observations tirées des caractéristiques des solutions sans filtre.

# **DESIGN AND SIMULATION PLATFORM FOR OPTICAL FILTERLESS NETWORKS**

ARCHAMBAULT, Émile

## **ABSTRACT**

Recent technological advances have enabled the development of new optical network architectures. Indeed, optical networks made exclusively of passive splitters and fibers are now conceived to offer a cost-efficient and reliable alternative to standard long-haul optical networks. This new technology is called filterless. In order to study its properties in reference networks, a design and simulation platform for filterless networks is proposed in this Master's thesis. Moreover, as the number of wavelengths in filterless networks is often higher than in standard networks, a wavelength blocker placement method that optimizes this component's usage is also outlined. Finally, the results obtained by the design and simulation platform for filterless networks are exposed along with a number of observations drawn from the filterless solution's characteristics.

## TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION .....	1
CHAPITRE 1 RÉSEAUX OPTIQUES SANS FILTRE .....	3
1.1    Réseaux optiques traditionnels .....	3
1.1.1    Réseaux optiques WDM .....	3
1.1.2    Technologies des réseaux optiques WDM .....	4
1.1.3    Diffusion de l'information .....	7
1.2    Réseaux optiques sans filtre.....	8
1.2.1    Architecture des réseaux sans filtre .....	9
1.2.2    Composantes d'un réseau optique sans filtre.....	12
1.2.3    Représentation nodale.....	13
1.3    Références antérieures au concept de réseaux optiques sans filtre.....	15
1.3.1    Réseau de diffusion.....	15
1.3.2    Arbres lumineux .....	16
CHAPITRE 2 PLATEFORME DE CONCEPTION ET DE SIMULATION .....	18
2.1    Introduction.....	18
2.1.1    Théorie de la simulation de réseaux .....	19
2.1.2    Revue des outils de simulation .....	20
2.1.3    Logiciel Nortel NetCalc Optical Planner™ .....	23
2.2    Solution proposée .....	25
2.2.1    Environnement de développement MATLAB® .....	26
2.2.2    Tâches effectuées.....	26
2.2.3    Paramètres entrants .....	27
2.2.4    Affichage des résultats.....	28
CHAPITRE 3 PRINCIPES DE CONCEPTION ET DE SIMULATION .....	30
3.1    Conception d'une architecture sans filtre et routage des demandes .....	30
3.1.1    Introduction à la création d'arbres de fibres et au routage .....	30
3.1.2    Algorithmes de création d'arbres de fibres.....	31
3.2    Assignation de longueurs d'onde.....	34
3.2.1    Algorithmes .....	35
3.2.2    Création de la matrice de conflit.....	37
3.3    Placement des bloqueurs de longueurs d'onde.....	41
3.3.1    Bloqueurs de longueurs d'onde .....	42
3.3.2    Approches intuitives de placement des bloqueurs.....	44
3.3.3    Résolution par programmation linéaire .....	47
3.3.4    Résolution par une métahéuristique.....	52
3.3.5    Analyse comparative des méthodes de placement des bloqueurs .....	54

CHAPITRE 4 RÉSULTATS ET ANALYSES .....	57
4.1    Présentation des résultats de conception et de simulation .....	57
4.1.1    Réseau allemand à 7 nœuds .....	60
4.1.2    Réseau italien .....	64
4.1.3    Réseau allemand à 17 nœuds .....	68
4.1.4    Réseau californien .....	72
4.2    Analyse des résultats .....	76
4.2.1    Analyse comparative : réseaux sans filtre et traditionnels .....	76
4.2.2    Analyse statistique des solutions sans filtre .....	79
4.2.3    Longueur des arbres de fibres .....	80
4.2.4    Nœuds d'une solution sans filtre .....	82
4.3    Résultats : bloqueurs de longueurs d'onde .....	84
4.3.1    Réseaux allemand à 17 nœuds et californien .....	84
4.3.2    Augmentation du trafic .....	86
CONCLUSION .....	88
ANNEXE I    DIAGRAMME DES ÉTAPES D'ÉLABORATION D'UNE SOLUTION SANS FILTRE .....	90
ANNEXE II    EXEMPLE DE RAPPORTS GÉNÉRÉS PAR LA PLATEFORME DE CONCEPTION ET DE SIMULATION .....	91
ANNEXE III    REPRÉSENTATION GRAPHIQUE DES SOLUTIONS SANS FILTRE PROPOSÉES .....	92
LISTE DE RÉFÉRENCES .....	96

## LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 3.1 Détail de l'équation 3.4 selon les différents types de conflits .....	50
Tableau 3.2 Résultats de l'assignation de longueurs d'onde selon les méthodes de placement des bloqueurs.....	55
Tableau 4.1 Critères de sélection des solutions sans filtre .....	58
Tableau 4.2 Principales caractéristiques du réseau allemand à sept nœuds .....	60
Tableau 4.3 Sommaire des solutions traditionnelles pour le réseau allemand à 7 nœuds .....	61
Tableau 4.4 Solutions sans filtre proposées pour le réseau allemand à 7 nœuds .....	62
Tableau 4.5 Principales caractéristiques du réseau italien .....	64
Tableau 4.6 Sommaire des solutions traditionnelles pour le réseau italien.....	65
Tableau 4.7 Solutions sans filtre proposées pour le réseau italien .....	66
Tableau 4.8 Principales caractéristiques du réseau allemand à 17 nœuds.....	68
Tableau 4.9 Sommaire des solutions traditionnelles pour le réseau allemand à 17 nœuds .....	69
Tableau 4.10 Solutions sans filtre proposées pour le réseau allemand à 17 nœuds .....	70
Tableau 4.11 Principales caractéristiques du réseau californien .....	72
Tableau 4.12 Sommaire des solutions traditionnelles pour le réseau californien .....	73
Tableau 4.13 Solutions sans filtre proposées pour le réseau californien.....	74
Tableau 4.14 Différences entre les paramètres des solutions sans filtre et traditionnelles .....	76
Tableau 4.15 Tableau comparatif des coûts entre trois types de solutions pour le réseau allemand à sept nœuds .....	77
Tableau 4.16 Longueur minimale des arbres de fibres pour différents réseaux .....	81
Tableau 4.17 Nombre de longueurs d'onde en fonction du nombre de bloqueurs pour différents réseaux optiques sans filtre.....	85
Tableau 4.18 Comparaison des coûts pour le réseau allemand à 17 nœuds.....	85
Tableau 4.19 Congestion maximale de la solution sans filtre 2 .....	86

Tableau 4.20 Coût de la solution sans filtre 2 du réseau allemand à sept nœuds.....87

## LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1 <i>Schéma global d'un réseau optique</i> .....	4
Figure 1.2 <i>Réseau optique opaque</i> .....	6
Figure 1.3 <i>Réseau optique sans filtre</i> .....	10
Figure 1.4 <i>Représentation par contacts du réseau de la figure 1.3</i> .....	11
Figure 1.5 <i>Arbres de fibres du réseau de la figure 1.3</i> .....	12
Figure 1.6 <i>Diviseur optique passif</i> .....	13
Figure 1.7 <i>Ligne de transmission optique</i> .....	13
Figure 1.8 <i>Connexions internes d'un nœud de degré 3</i> .....	14
Figure 1.9 <i>Schéma réelle des connexions internes</i> .....	15
Figure 1.10 <i>Arbre de fibres contenant des arbres lumineux</i> .....	17
Figure 2.1 <i>Interface graphique de NetCalc Optical Planner™</i> .....	24
Figure 2.2 <i>Représentation du réseau sans filtre complet</i> .....	29
Figure 2.3 <i>Représentation par contacts d'un arbre de fibres d'une solution sans filtre</i> ...	29
Figure 3.1 <i>Arbres de fibres d'un réseau à quatre nœuds</i> .....	31
Figure 3.2 <i>Distance maximale de combinaison d'un arbre de fibres</i> .....	33
Figure 3.3 <i>Assignation de longueurs d'onde dans un réseau opaque</i> .....	37
Figure 3.4 <i>Assignation de longueurs d'onde dans un réseau optique sans filtre</i> .....	38
Figure 3.5 <i>Arbre de fibres d'une solution sans filtre</i> .....	39
Figure 3.6 <i>Différentes demandes sur un même arbre de fibres</i> .....	39
Figure 3.7 <i>Arbre de fibres avec combinaison du signal optique</i> .....	40
Figure 3.8 <i>Demandes satisfaites sur un arbre de fibres avec combinaison du signal</i> .....	41
Figure 3.9 <i>Bloqueur de longueurs d'onde simple</i> .....	43

Figure 3.10	<i>Insertion d'un bloqueur de longueurs d'onde dans un arbre de fibres.</i>	43
Figure 3.11	<i>Comportement spectral d'un diviseur optique passif.</i>	45
Figure 3.12	<i>Ajout de bloqueurs de longueurs d'onde après les diviseurs optiques passifs.</i>	45
Figure 3.13	<i>Ajout de bloqueur de longueurs d'onde au centre des sections.</i>	46
Figure 3.14	<i>Ajout de bloqueur de longueurs d'onde selon la congestion.</i>	47
Figure 3.15	<i>Arbres de fibres des solutions sans filtre 2 et 3.</i>	56
Figure 4.1	<i>Topologie du réseau allemand à sept nœuds (Betker et al., 2004).</i>	60
Figure 4.2	<i>Solution sans filtre 2 du réseau allemand à 7 nœuds.</i>	63
Figure 4.3	<i>Représentation par contacts d'un arbre de fibres de la solution 2.</i>	63
Figure 4.4	<i>Topologie du réseau italien(Ali, 2005).</i>	64
Figure 4.5	<i>Solution sans filtre 1 du réseau italien.</i>	67
Figure 4.6	<i>Représentation par contacts d'un arbre de fibres de la solution 1.</i>	67
Figure 4.7	<i>Topologie du réseau allemand à 17 nœuds (Betker et al., 2004).</i>	68
Figure 4.8	<i>Solution sans filtre 4 du réseau allemand à 17 nœuds.</i>	71
Figure 4.9	<i>Représentation par contacts d'un arbre de fibres de la solution 4.</i>	71
Figure 4.10	<i>Topologie du réseau californien (Silvester et Reese, 2002).</i>	72
Figure 4.11	<i>Solution sans filtre 5 du réseau californien.</i>	75
Figure 4.12	<i>Représentation par contacts d'un arbre de fibres de la solution 5.</i>	75
Figure 4.13	<i>Solution du réseau italien à 10 nœuds avec combinaison du signal.</i>	83
Figure 4.14	<i>Solution du réseau italien à 10 nœuds sans combinaison du signal.</i>	83

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

WDM	Wavelength Division Multiplexing
CWDM	Coarse Wavelength-Division Multiplexing
DWDM	Dense Wavelength-Division Multiplexing
OADM	Optical Add-Drop Multiplexer
ROADM	Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexer
LAN	Local Area Network
PON	Passive Optical Network
GPON	Gigabit-capable Passive Optical Network
SONET	Synchronous optical network
SDH	Synchronous Digital Hierarchy
WSS	Wavelength-Selective Switch
OSNR	Optical Signal to Noise Ratio
MEMS	Micro Electro Mechanical Systems

## **LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE**

### **UNITÉS DE BASE**

m            mètre (unité de longueur)

nm            nanomètre ( $= 10^{-9}$  m)

km            kilomètre ( $= 10^3$  m)

### **UNITÉS DE TEMPS**

s            seconde

ps            picoseconde ( $= 10^{-12}$  s)

### **SYMBOLE**

$\lambda$             longueur d'onde

## INTRODUCTION

Des avancées technologiques récentes dans le domaine de la transmission par fibre optique laissent entrevoir la possibilité de concevoir de nouveaux types de réseaux optiques à multiplexage de longueurs d'onde. Ainsi, une équipe de recherche, composée de chercheurs de Nortel, de professeurs de l'École de Technologie Supérieure et de l'Université McGill, ainsi que d'étudiants de ces mêmes universités, a développé un nouveau type de réseaux optiques appelé *réseaux optiques sans filtre*. Ces réseaux longue distance ont la particularité d'être composés uniquement de fibres optiques reliées entre elles par des diviseurs optiques passifs.

Pour étudier les concepts de base de cette nouvelle technologie, une première étape consiste à créer des solutions sans filtre virtuelles pour différents réseaux de référence. Ensuite, un trafic est simulé sur ces solutions pour permettre à la fois d'observer les caractéristiques des réseaux sans filtre et de comparer cette technologie avec d'autres technologies de réseaux optiques plus standard.

L'objectif principal de ce mémoire est de **créer une plateforme de conception et de simulation pour les réseaux optiques sans filtre**. Comme les algorithmes de conception de l'architecture sans filtre ont déjà été développés dans des travaux antérieurs, ce mémoire analyse plutôt les algorithmes de simulation et le fonctionnement global de la plateforme de conception et de simulation. De plus, un autre objectif de ce mémoire est de **concevoir un module de placement des bloqueurs de longueurs d'onde** qui sont parfois nécessaires dans les réseaux optiques sans filtre. Finalement, le dernier objectif est d'**étudier les solutions sans filtre obtenues avec les outils d'analyse fournis par la plateforme**.

Le premier chapitre de ce mémoire contient les principes généraux de la technologie sans filtre ainsi qu'un résumé des technologies de transmission par fibre optique existantes. Le deuxième chapitre comprend une revue des outils de simulation disponibles sur le marché ainsi que le fonctionnement global de la plateforme de conception et de simulation. Dans le

troisième chapitre, l'assignation de longueurs d'onde et la problématique du placement des bloqueurs de longueurs d'onde sont étudiées. Finalement, le dernier chapitre contient les résultats obtenus avec la plateforme de conception et de simulation sur des réseaux de référence ainsi que des observations tirées de ces résultats.

# CHAPITRE 1

## RÉSEAUX OPTIQUES SANS FILTRE

### 1.1 Réseaux optiques traditionnels

Les réseaux optiques sans filtre font partie de la famille de réseaux optiques à multiplexage en longueurs d'onde. Cette section explique les principes de base de cette nouvelle technologie en plus de définir les types de réseaux optiques traditionnels existants. Le terme *traditionnel*, par opposition à *sans filtre*, fait référence aux réseaux optiques déployés présentement sur le terrain qui utilisent des composants actifs (commutateurs à conversion optoélectronique ou tout optiques) pour la commutation ou le routage.

#### 1.1.1 Réseaux optiques WDM

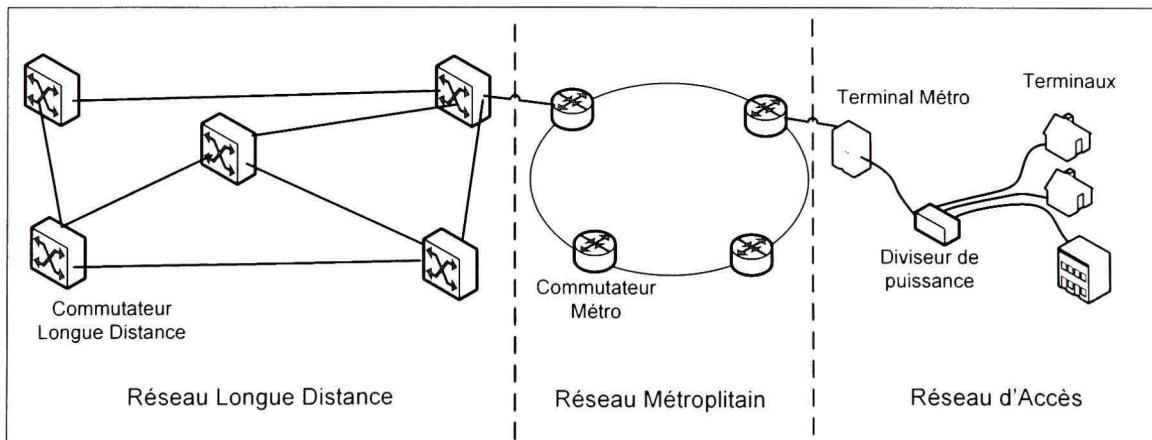
Depuis plusieurs années, d'immenses efforts ont été déployés pour augmenter la capacité des réseaux de télécommunication optique. Le multiplexage en longueur d'onde WDM (*wavelength-division multiplexing*) accroît considérablement la capacité des lignes de transmission par fibre optique. Le principe consiste à insérer plusieurs canaux de transmission sur des longueurs d'onde différentes dans une même fibre. Il est alors possible de transmettre des térabits d'information par seconde. Les réseaux optiques WDM sont « [...] largement déployés par les fournisseurs de services dans les réseaux longue distance, et sont de plus en plus déployés dans les réseaux métropolitains [...] » (Ramaswami, 2006).

Le multiplexage en longueur d'onde se divise en deux catégories selon la séparation spectrale entre les canaux de transmission. La technologie à multiplexage en longueurs d'onde grossier CWDM (*coarse wavelength-division multiplexing*) permet l'insertion de 4 à 16 longueurs d'ondes séparées par une largeur spectrale de quelques dizaines de nanomètres. La grandeur de l'espacement entre les canaux rend cette technologie peu coûteuse.

La technologie à multiplexage en longueurs d'onde dense DWDM (*dense wavelength-division multiplexing*) est privilégiée pour des réseaux qui ont une plus grande distance entre les nœuds et qui doivent optimiser leur volume de transmission. La largeur spectrale entre les longueurs d'ondes n'est alors qu'une fraction de nanomètre, ce qui implique des composantes plus performantes et donc plus coûteuses pour cette technologie. En utilisant cette méthode, il est par contre possible de combiner des dizaines de longueurs d'onde sur un lien optique. Les réseaux étudiés dans ce mémoire sont de ce type.

### 1.1.2 Technologies des réseaux optiques WDM

Les réseaux optiques WDM sont divisés en trois grands groupes selon la superficie qu'ils couvrent. Il y a les réseaux longue distance, les réseaux métropolitains et les réseaux d'accès (figure 1.1). Un des facteurs clé dans le choix d'une des technologies optiques est la portée de transmission. Les technologies et composantes utilisées sont donc spécifiques pour chacun des groupes.



**Figure 1.1 Schéma global d'un réseau optique.**

Dans cette section, chacun de ces groupes est défini. En regard des objectifs de ce mémoire, l'emphase est mise sur les réseaux longue distance.

## Réseau d'accès et métropolitains

Les réseaux d'accès se situent à la limite extérieure des réseaux de télécommunication, c'est-à-dire qu'ils assurent la connexion de l'utilisateur (ou d'une entité très proche) aux réseaux de plus grande envergure. La technologie PON (*Passive Optical Network*) peut être utilisée dans ce type de réseau. Cette technologie offre une large bande passante à l'utilisateur, en plus d'employer des composantes passives ce qui diminue énormément les coûts de chaque connexion. Le nombre d'usagers pouvant être desservis par un seul terminal peut atteindre 64 utilisateurs. De plus, la technologie GPON (*Gigabit capable PON*) assure des liaisons étendues allant jusqu'à 60 km.

Les réseaux métropolitains connectent les réseaux longue distance aux réseaux d'accès. La distance moyenne entre les noeuds de ces réseaux est d'environ une centaine de kilomètres. Les réseaux métropolitains actuels ont généralement une architecture en anneaux interconnectés et une hiérarchie synchrone SONET (*synchronous optical networking*) ou SDH (*synchronous optical hierarchy*). La technologie WDM est utilisée abondamment dans les réseaux métropolitains pour augmenter leur capacité car ils sont généralement fortement congestionnés (Mukherjee, 2006).

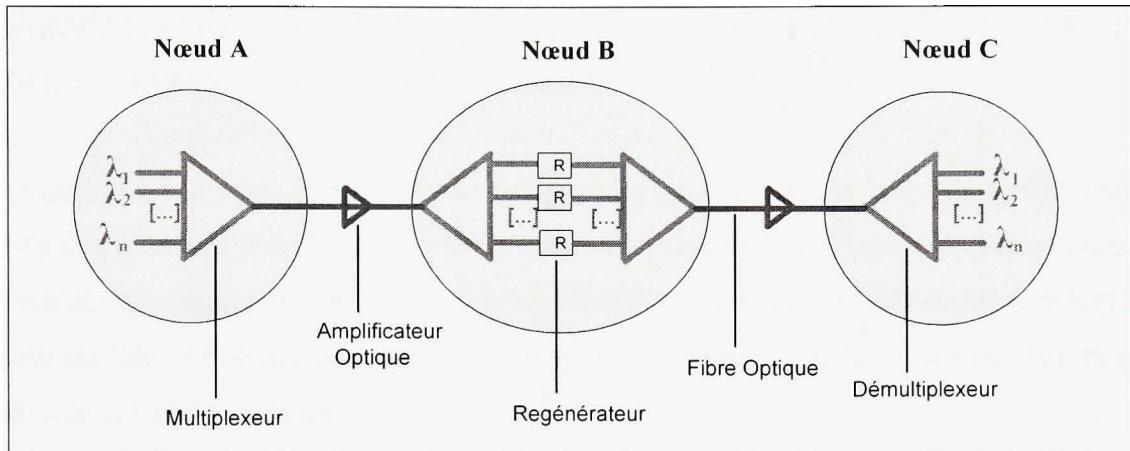
## Réseau Longue Distance

Les noeuds des réseaux optiques longue distance sont distants de plusieurs centaines de kilomètres les uns des autres. Selon la technologie utilisée, les composantes à l'intérieur des noeuds commutent un signal optique ou électronique. Les trois générations de réseaux optiques WDM telles que définies par Gumaste (2003) sont décrites ci-dessous.

### Réseaux 1<sup>ère</sup> et 2<sup>ième</sup> Génération

Une partie des réseaux optiques WDM longue distance déployés présentement sont opaques, c'est-à-dire que le signal optique est converti en signal électrique à chacun des noeuds du

réseau (figure 1.2). Ce type de commutation correspond à la première génération de réseaux optiques. Comme la régénération du signal implique une détection puis une retransmission du signal optique, de nombreuses et coûteuses composantes sont présentes à l'intérieur des nœuds intermédiaires (récepteurs et transmetteurs optiques, multiplexeurs et démultiplexeurs).



**Figure 1.2 Réseau optique opaque.**

Avec l'arrivée sur le marché de systèmes de transmission ayant une portée de plusieurs centaines et même de milliers de kilomètres, il n'est plus toujours nécessaire de régénérer le signal à chacun des nœuds intermédiaires de la connexion. Le signal optique est alors commuté à l'intérieur des nœuds intermédiaires vers le nœud de destination par des multiplexeurs à insertion/extraction optique (OADM). Cette avancée technologique est associée à l'émergence de la deuxième génération de réseaux optiques.

### Réseaux 3<sup>ième</sup> Génération

Comme les réseaux longue distance ont souvent une topologie maillée, de nouvelles composantes pouvant commuter les signaux de manière optique ou numérique dans des nœuds de degré supérieur à deux apparaissent ensuite sur le marché, ce qui introduit alors la troisième génération de réseaux optiques.

Les commutateurs numériques convertissent le signal lumineux en signal électrique, ce qui permet, grâce à l'accès au signal électrique, d'avoir une granularité très fine des informations et de régénérer le signal. Par contre, ils consomment beaucoup d'énergie et coûtent encore très cher. Les commutateurs optiques traitent plutôt le signal au niveau de la longueur d'onde ce qui permet un haut débit de commutation. Par contre, leur technologie est récente et ils sont aussi très chers. De plus, les multiplexeurs à insertion/extraction optique sont maintenant reconfigurables (ROADM), ce qui veut dire que la matrice de commutation peut être modifiée selon les caractéristiques du trafic.

En résumé, il n'y a pas encore de technologie adaptée aux réseaux optiques WDM longue portée ayant un faible coût et une fiabilité éprouvée. La recherche dans ce domaine concerne les réseaux ayant un trafic très dense, une distance élevée entre les nœuds et une topologie de réseau maillée. Les objectifs de recherche sont de minimiser les coûts de ces réseaux en plus d'assurer une pleine fiabilité.

### 1.1.3 Diffusion de l'information

Lorsque les réseaux optiques WDM sont classés selon leur méthode de diffusion de l'information, ils se divisent en deux catégories : les réseaux de diffusion et les réseaux à routage de longueurs d'onde (Mukherjee, 2006).

Dans les réseaux de diffusion, le message envoyé par un nœud est transmis vers l'ensemble des nœuds du réseau. Le récepteur accordable du nœud de destination sélectionne ensuite la bonne fréquence pour établir une connexion. La composante qui permet de diviser le signal optique peut être active ou passive. À sa plus simple expression, il s'agit d'un élément composé de plusieurs diviseurs optiques passifs (coupleur étoile). Ce type de réseau permet la multidiffusion, c'est-à-dire l'envoi d'un signal source vers plus d'une destination. Pour réaliser cette fonctionnalité, plusieurs nœuds destinataires accordent leur récepteur à la fréquence d'émission de la source.

Quant aux réseaux optiques WDM à routage de longueurs d'onde, ils sont constitués de chemins optiques commutés par des composantes actives à l'intérieur des nœuds. Un chemin optique est défini par Mukherjee (2006) comme étant un canal de communication optique établi entre deux nœuds, qui occupe une longueur d'onde précise et qui permet de satisfaire une demande de trafic. Ainsi, un chemin entièrement ou partiellement optique est créé entre le nœud d'origine et celui de destination (selon qu'il y ait ou non reconversion électronique du signal optique). Le signal est aiguillé par les commutateurs des nœuds intermédiaires. De plus, il ne peut pas y avoir deux chemins optiques présents sur le même lien et ayant la même longueur d'onde.

Tout en s'assurant de respecter cette contrainte, l'algorithme d'assignation de longueurs d'onde aura pour objectif de minimiser le nombre total de longueurs d'onde du réseau. Pour ce qui est du routage des demandes, c'est-à-dire du choix du chemin optique, l'algorithme déterminera généralement le plus court chemin entre les nœuds pour ainsi minimiser le coût de transmission (Choi, 2003).

## 1.2 Réseaux optiques sans filtre

Ce mémoire porte sur un nouveau type de réseau optique WDM longue distance appelé réseau optique sans filtre. L'idée maîtresse est de remplacer les composantes actives des réseaux optiques WDM traditionnels comme les commutateurs optiques ou les ROADM souvent très chères, par des diviseurs optiques passifs. Ainsi, le retrait de ces composantes diminue grandement les coûts d'implantation et de modification du réseau.

Deux avancées technologiques récentes dans le domaine optique ont permis la conception de réseaux optiques sans filtre (Tremblay, Gagnon et Châtelain, 2006). La première est la conception de modules de compensation électronique de dispersion. Ces modules gèrent numériquement les problèmes de dispersion du signal sans utiliser de fibres de compensation de dispersion, simplifiant l'ingénierie des liaisons optiques et diminuant les coûts de transmission en plus de rendre beaucoup moins complexes les exercices de reconfiguration

du réseau. De plus, elles atténuent le signal optique ce qui nécessite alors une amplification supplémentaire. Par exemple, la limite des modules de compensation électronique de dispersion développés par Nortel se situe aux environs de 80 000 ps/nm, ce qui permet la création de lignes de transmission d'une longueur de 5000 km sans compensation optique de dispersion.

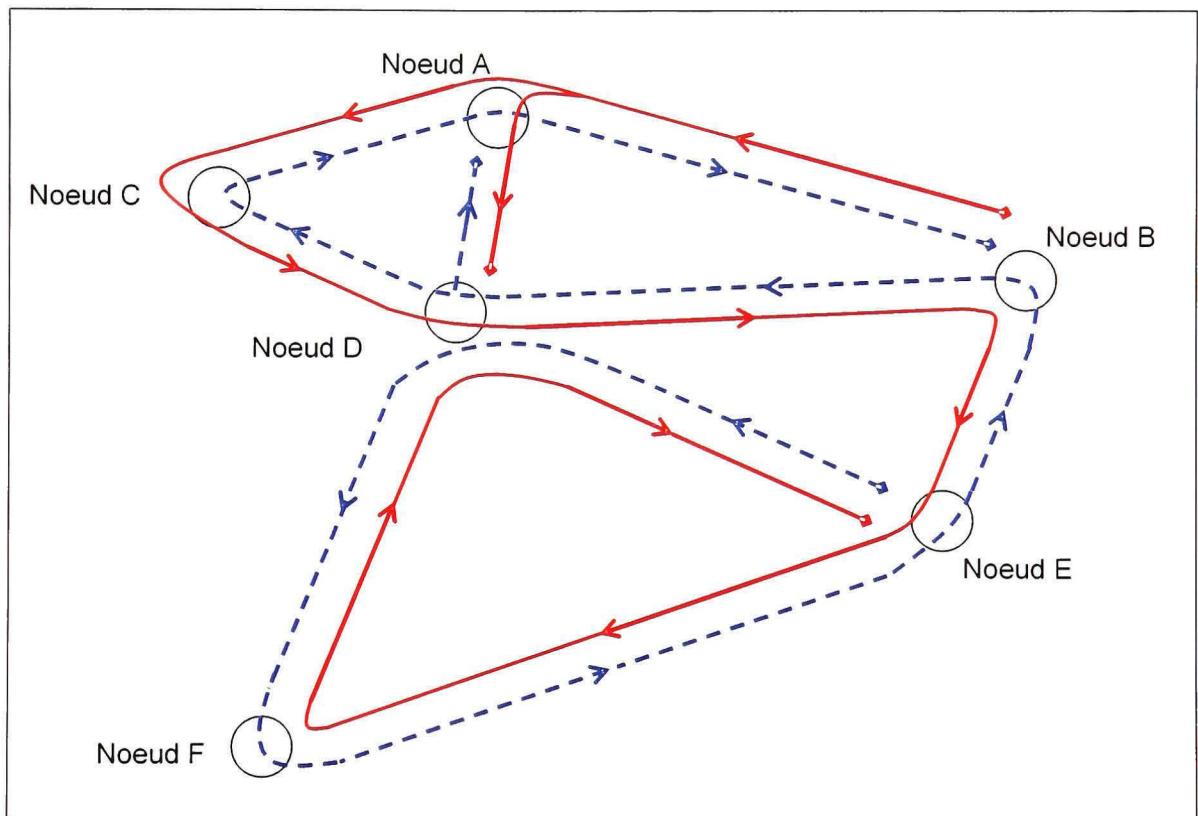
La deuxième avancée technologique majeure est la commercialisation de transmetteurs et de récepteurs accordables. En effet, après de nombreuses années de recherche, ils démontrent maintenant une grande fiabilité et ont un coût raisonnable. Selon Aramideh (2003), les récepteurs et transmetteurs accordables sont désormais «*facilement intégrables dans un système existant et ce, à un coût comparable aux interfaces fixes*». De plus, tout comme les modules de compensation électronique de dispersion, ils rendent possible une modification dynamique du réseau en fonction des demandes, ce qui améliore grandement la gestion des ressources du réseau.

### 1.2.1 Architecture des réseaux sans filtre

Comme énoncé précédemment, les réseaux optiques sans filtre sont conçus en connectant entre elles les fibres d'un réseau avec des diviseurs optiques passifs. L'interconnexion des fibres forme alors l'architecture des réseaux optiques sans filtre. L'objectif premier lors de la création de l'architecture est d'avoir un maximum de connexions possibles entre les nœuds du réseau. De plus, pour que le réseau soit fonctionnel, les solutions de réseaux optiques sans filtre doivent fournir une connectivité entre tous les nœuds du réseau.

La figure 1.3 montre une solution sans filtre d'un réseau optique à 6 nœuds. Dans cette solution, chaque nœud peut établir une connexion avec tous les autres. Par exemple, dans le cas où il y a une demande de trafic entre les nœuds B et F, l'information se transmet à partir du nœud B sur les liens en passant par les nœuds A, C, D et E, pour finalement arriver au nœud de destination.

Par définition, les liens connectés ensemble forment des *arbres de fibres*. Cette appellation propre aux réseaux optiques sans filtre provient du fait que les fibres connectées entre elles forment une architecture similaire à un arbre. Cette terminologie fait référence au concept d'arbres lumineux défini par Mukherjee (2006) pour les réseaux à multidiffusion avec commutateurs optiques. La solution de la figure 1.3 comprend donc deux arbres de fibres correspondant aux traits rouge et bleu sur le schéma. Les flèches indiquent le sens de la propagation de la lumière.

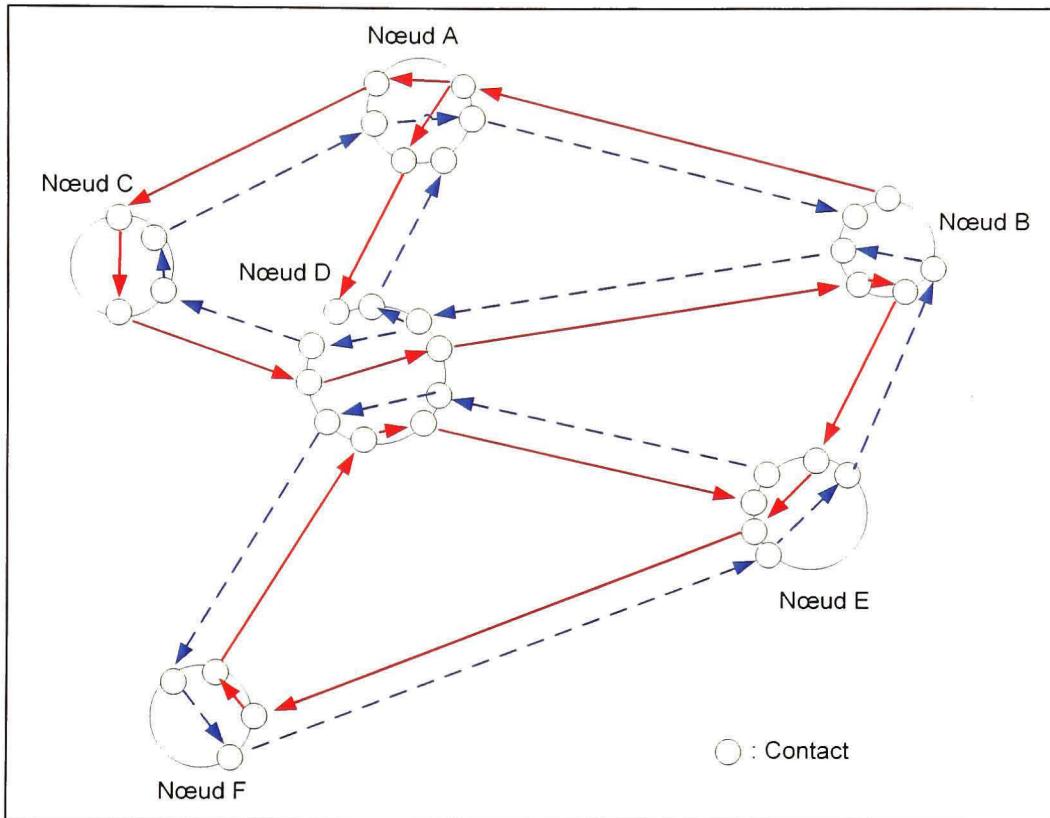


**Figure 1.3 Réseau optique sans filtre.**

(Modifié de Tremblay, Gagnon, Châtelain (2006, p. 31))

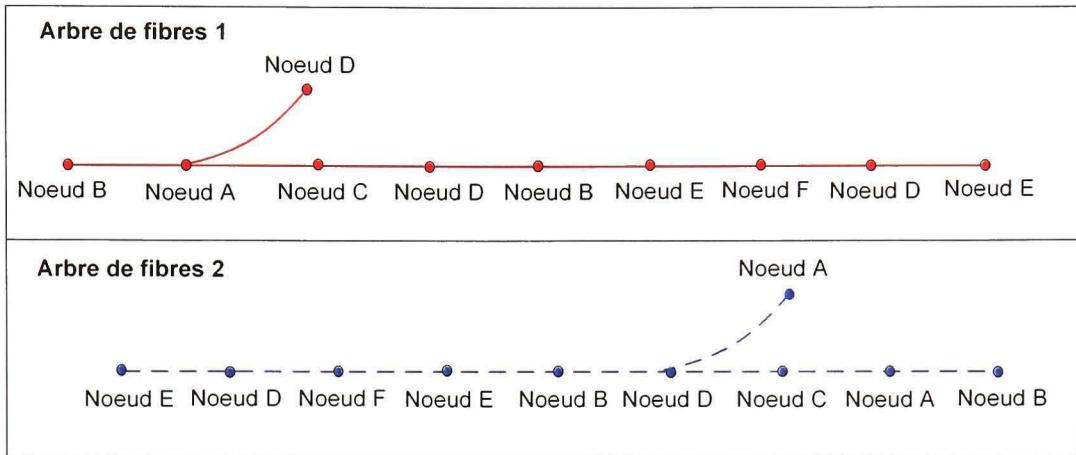
Les points de connexion des fibres optiques dans les nœuds sont indiqués par des contacts (figure 1.4). Les connexions internes sont donc établies d'un ou de plusieurs contacts vers un ou plusieurs autres, selon l'architecture des arbres de fibres. La figure 1.5 est une

représentation alternative (soit par arbres de fibres) de la figure 1.3. Ce type de schéma permet une visualisation rapide de la connectivité des arbres de fibres d'un réseau optique sans filtre.



**Figure 1.4 Représentation par contacts du réseau de la figure 1.3.**

Sur la figure 1.5, les nœuds d'origine se situent à l'extrême gauche des arbres de fibres, la lumière s'y propageant de la gauche vers la droite. Les embranchements indiquent la présence de diviseurs optiques passifs qui distribuent le signal vers deux directions. Par exemple, dans l'arbre de fibres 1, le signal optique est divisé au nœud A et transmis vers les nœuds C et D.



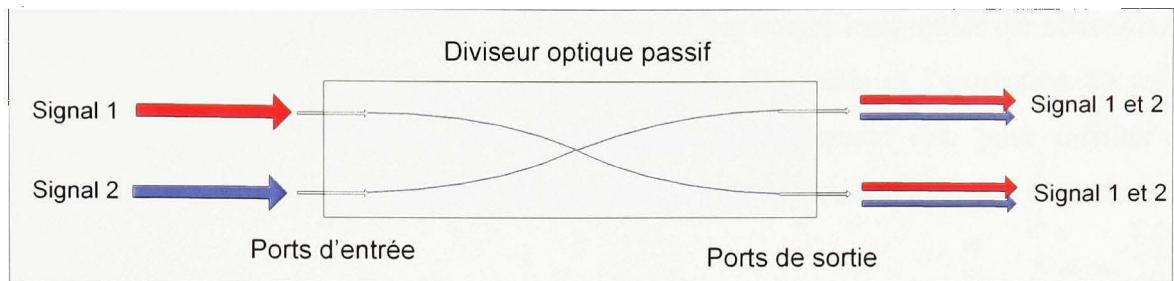
**Figure 1.5 Arbres de fibres du réseau de la figure 1.3.**

### 1.2.2 Composantes d'un réseau optique sans filtre

Les réseaux optiques sans filtre sont formés de quatre composantes de bases qui sont : les transmetteurs/récepteurs accordables, les diviseurs optiques passifs, en plus de la fibre optique et des amplificateurs à fibre optique (Tremblay, Gagnon et Châtelain, 2006).

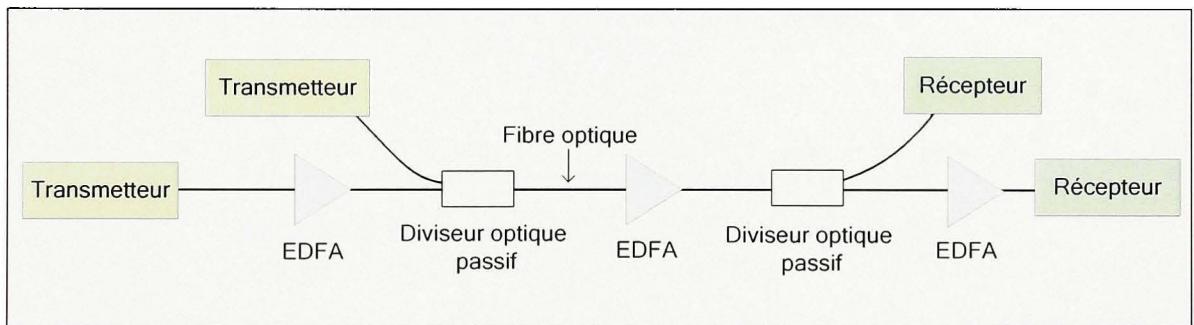
Les caractéristiques de base du système de transmission (portée, pertes des composantes) sont prises en compte lors de la conception des arbres de fibre. Par contre, le nombre maximal de longueurs d'onde par fibre optique n'est pas fixé dans ce mémoire car la limite n'est pas encore clairement établie.

Les diviseurs optiques passifs sont des composantes simples, créées par la fusion de deux fibres qui ne demandent pas d'alimentation électrique (Keiser, 2000). Ils sont utilisés pour insérer et extraire le trafic local des nœuds en plus d'opérer la division et la combinaison des signaux optiques sur les arbres de fibres. Pour ce faire, ils combinent les signaux provenant des deux ports d'entrée et distribuent également la puissance du signal combiné vers les deux ports de sortie (figure 1.6). Il y a alors à une perte de 3 dB de la puissance du signal sur l'arbre de fibres (sans compter la perte due aux connexions d'environ 1dB).



**Figure 1.6 Diviseur optique passif.**

La figure 1.7 montre les différentes composantes d'un réseau optique sans filtre sur la ligne de transmission. Cette ligne de transmission représente un exemple d'arbre de fibres. Les diviseurs optiques passifs sont placés à chacun des embranchements de la ligne.



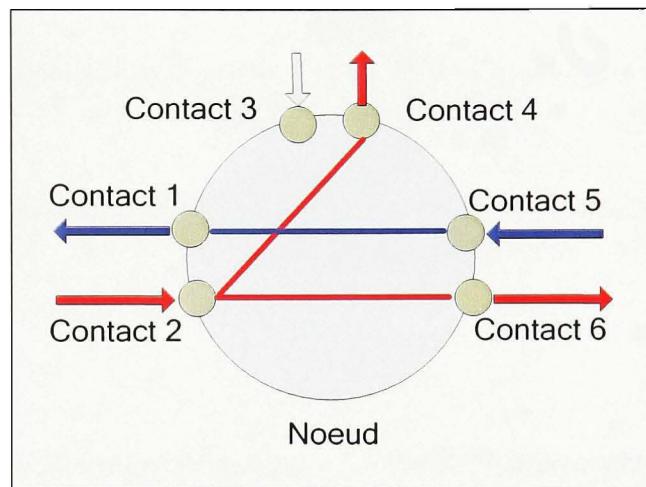
**Figure 1.7 Ligne de transmission optique.**

Des bloqueurs de longueurs d'onde peuvent aussi être insérés dans un réseau optique sans filtre pour diminuer la congestion et d'augmenter la protection. Dans la section 3.3, le fonctionnement du bloqueur de longueurs d'onde et l'impact de son ajout dans les réseaux optiques sans filtre sont expliqués.

### 1.2.3 Représentation nodale

Dans les réseaux optiques sans filtre, chacune des terminaisons des fibres d'un nœud est identifiée comme étant un contact. Ainsi, les connexions internes d'un nœud se font entre les contacts. Par exemple, à la figure 1.8, le signal lumineux arrivant au contact 2 est divisé puis

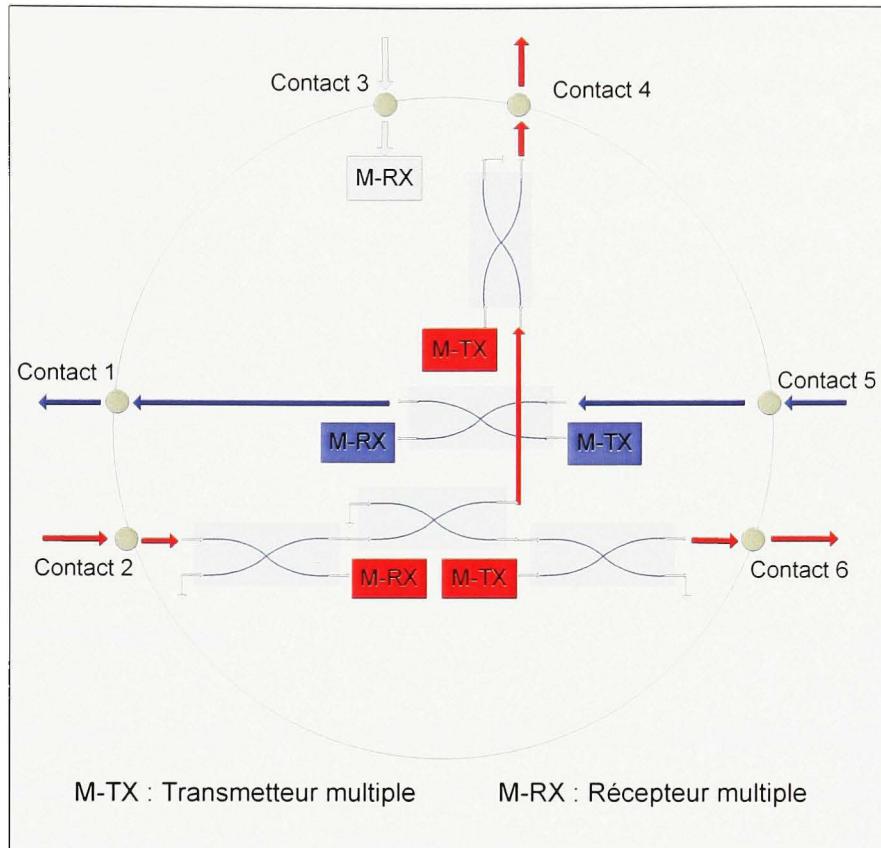
transmis au contact 4 et au contact 6. Cette figure est par contre incomplète car elle ne tient pas compte des diviseurs optiques passifs ainsi que de l'insertion et l'extraction du trafic local dans les arbres de fibres. Elle n'est utilisée généralement que pour faciliter la visualisation d'un réseau et pour mieux comprendre les algorithmes de création des arbres de fibres.



**Figure 1.8 Connexions internes d'un nœud de degré 3.**

Il faut avoir recours à une représentation plus complète pour comprendre comment les composantes sont connectées à l'intérieur des nœuds. La figure 1.9 permet d'avoir une vision réelle et entière du nœud de la figure 1.8 puisque les transmetteurs et les récepteurs ainsi que les diviseurs optiques passifs y sont inclus. Cette figure représente une technique d'agencement possible des éléments à l'intérieur d'un nœud de réseaux optiques sans filtre et non un schéma unique car différents agencements peuvent permettre d'obtenir une même fonctionnalité.

Par définition, le degré de division correspond au nombre de contacts de sortie associés à un signal d'entrée. Le degré de combinaison quant à lui correspond au nombre de contacts d'entrée d'un signal combiné. À la figure 1.8, le degré de division est de deux car le signal d'entrée au contact 2 est transmis aux contacts 4 et 6.



**Figure 1.9 Schéma réelle des connexions internes.**

### 1.3 Références antérieures au concept de réseaux optiques sans filtre

Les réseaux optiques sans filtre ont des éléments communs avec certains types de réseaux présents dans la littérature. Cette section relève les références antérieures connexes à la technologie sans filtre.

#### 1.3.1 Réseau de diffusion

Dans les réseaux optiques sans filtre, un transmetteur et un récepteur accordent leur fréquence pour créer une communication entre eux. Comme plusieurs canaux de transmission se retrouvent dans la même fibre et qu'il y a, au récepteur, sélection d'un canal pour assurer une transmission, ce principe est similaire à celui des réseaux de diffusion (voir section 1.1.3). Par contre, les nœuds n'ont pas nécessairement accès à la totalité de

l'information circulant à travers le réseau; cela dépend de la composition des arbres de fibres. De plus, les réseaux traditionnels de diffusion sont de type LAN (*Local Area Network*) ce qui n'est pas le cas pour les réseaux optiques sans filtre qui peuvent aussi s'étendre sur de longues distances.

Finalement, les réseaux de diffusion contiennent un commutateur central permettant de diffuser l'information à chacun des nœuds. Les réseaux optiques sans filtre, quant à eux, assurent la division et la combinaison du signal à l'intérieur de plusieurs nœuds du réseau et de manière décentralisée, ce qui a pour avantage de limiter l'impact d'une panne sur le fonctionnement de l'ensemble du réseau.

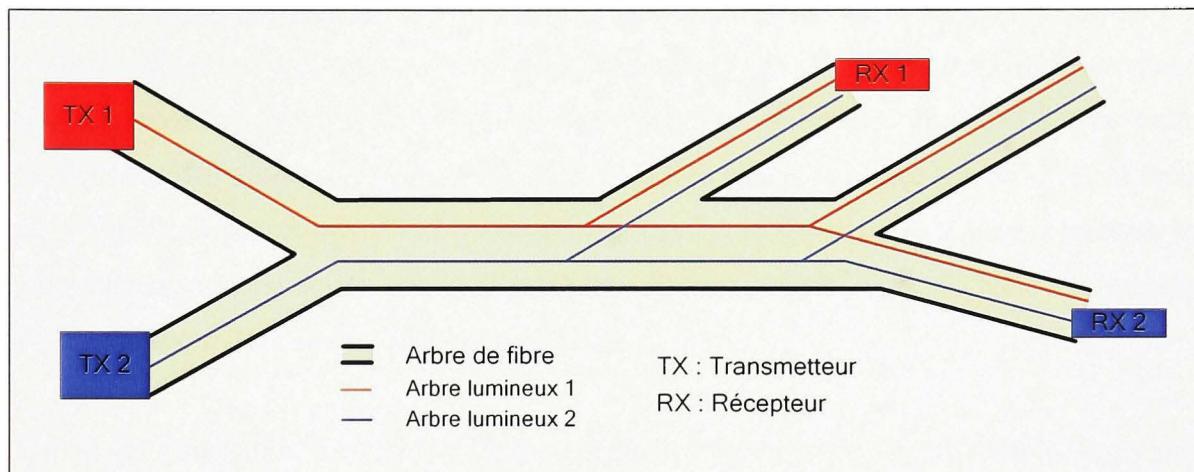
### 1.3.2 Arbres lumineux

L'extension du chemin optique pour la multidiffusion se nomme l'arbre lumineux. En effet, l'arbre lumineux est défini comme un canal optique point à multipoint qui traverse plusieurs liens de fibre (Mukherjee, 2006). Cette multidiffusion est idéalement effectuée par des commutateurs optiques car diviser la lumière est physiquement plus facile que reproduire les paquets de manière électronique. Ces arbres lumineux sont donc générés selon les connexions internes des commutateurs et forment la topologie virtuelle du réseau.

Dans les réseaux optiques sans filtre, les demandes sont aussi satisfaites en établissant des chemins optiques. Lorsqu'un chemin optique passe au travers de diviseurs optiques passifs, il y a alors création d'un arbre lumineux. Par contre, le but n'est pas nécessairement de faire une connexion à multidiffusion; *la multidiffusion résulte de l'architecture des réseaux optiques sans filtre*. L'inconvénient de cette multidiffusion involontaire est évidemment un accroissement de la congestion des liens à cause des longueurs d'onde sur les liens autres que ceux menant au noeud de destination de la demande.

Contrairement au concept d'arbre lumineux classique, la commutation ne se fait pas au niveau de la longueur d'onde mais bien au niveau de l'ensemble de la fibre par les diviseurs

optiques passifs. Ainsi, les arbres lumineux sont confinés à l'intérieur des arbres de fibres. La figure 1.10 montre un exemple dans lequel deux arbres lumineux, occupant chacun une longueur d'onde différente, se propagent à travers un arbre de fibres. L'établissement du chemin optique rouge provoque la création d'un arbre lumineux qui propage l'information sur les liens menant au récepteur 1 mais aussi sur d'autres liens inutiles pour la connexion (notamment le lien qui mène au récepteur 2).



**Figure 1.10 Arbre de fibres contenant des arbres lumineux.**

En résumé, comme il n'y a aucune composante pour limiter la propagation de la lumière dans les réseaux optiques sans filtre (à l'exception des bloqueurs de longueurs d'onde), l'établissement d'un chemin optique pour satisfaire une demande crée un arbre lumineux. De plus, cet arbre lumineux est confiné dans un arbre de fibres défini selon les connexions internes des fibres optiques au niveau des nœuds.

## CHAPITRE 2

### PLATEFORME DE CONCEPTION ET DE SIMULATION

#### 2.1 Introduction

L’élaboration d’une solution réseau est complexe à cause du grand nombre de paramètres à évaluer et nécessite souvent l’apport d’outils mathématiques pour permettre de générer une solution optimale. Ces outils peuvent avoir différentes tâches comme par exemple de placer adéquatement les éléments du réseau ou bien d’étudier les effets d’une variation de trafic. Dans le cas des réseaux optiques sans filtre, l’architecture d’une solution est d’abord créée par un outil de conception. Puis, un autre outil simule un trafic sur le réseau et analyse les caractéristiques de la solution. Ces tâches sont regroupées dans la *plateforme de conception et de simulation des réseaux optiques sans filtre*.

L’outil de conception de réseaux génère, selon les données de départ (emplacement des nœuds et des liens, demandes devant être satisfaites entre les nœuds) et les paramètres d’optimisation définis par l’utilisateur, une architecture sans filtre. Plus précisément, il connecte les fibres entre elles en ajoutant des diviseurs optiques passifs et des interconnexions dans les nœuds du réseau. L’architecture créée doit satisfaire toutes les demandes et respecter les différentes contraintes propres aux réseaux optiques (longueur maximale des arbres de fibres, distance maximale de combinaison, etc.). Comme l’architecture des réseaux optiques sans filtre est différente de celle des réseaux traditionnels, il n’existe pas d’outil de conception d’architecture sans filtre disponible sur le marché. Un outil de conception des réseaux optiques sans filtre a donc dû être créé expressément pour ce type de réseau.

La simulation des réseaux optiques sans filtre doit, quant à elle, permettre d’observer les caractéristiques du réseau lorsque qu’il supporte un trafic donné. Ces résultats seront ensuite comparés avec ceux des réseaux traditionnels. De plus, ils permettront de définir certains principes généraux propres aux réseaux optiques sans filtre. Durant la simulation, la solution

générée lors de l'étape de conception est testée en faisant varier différents paramètres. Par exemple, l'accroissement de la matrice de trafic entre les nœuds ou bien la modification de la topologie du réseau (ajout de nœuds ou de liens) peut être étudié. Le simulateur de réseaux évalue donc une solution d'architecture de réseau selon des paramètres qui se modifient en fonction du temps. Ce n'est pas une simulation de la transmission du signal optique au niveau de la couche physique ou réseau qui est réalisée mais plutôt un exercice de routage et d'assignation de longueurs d'onde pour chacune des connexions d'une matrice de trafic donnée. Les sections suivantes contiennent des informations concernant la théorie de la simulation de réseau et les outils de simulation existants sur le marché.

### 2.1.1 Théorie de la simulation de réseaux

Pour obtenir une simulation qui reflète précisément le comportement d'un réseau réel, il est important de connaître certaines notions théoriques de base concernant la planification, le déroulement et l'analyse de la simulation de réseau. Trop souvent, les résultats simulés seront différents lors de l'implantation du réseau réel. Les chercheurs du NIST et de la DARPA ont émis certaines recommandations permettant d'améliorer les résultats de simulation. La présente section en résume quelques-unes. Il est possible de trouver davantage d'information sur cette question dans Heidemann *et al.* (2001).

Tout d'abord, les principaux objectifs à atteindre lors d'une simulation sont :

1. Prédire la performance d'un réseau ou d'un protocole particulier,
2. Prédire le comportement d'un protocole ou d'un design pour un réseau projeté,
3. Explorer facilement et rapidement différents protocoles pour un réseau donné.

Pour que la simulation soit efficace, il est nécessaire de porter attention à différents aspects de celle-ci, notamment :

- représenter les résultats visuellement le plus souvent possible,
- incorporer le maximum de simulations asynchrones pour représenter efficacement le réseau réel,

- valider selon une comparaison avec un autre modèle et non dans l'absolu,
- faire attention à ne pas inclure de limites artificielles dans la simulation (dues par exemple au maximum de mémoire disponible sur l'ordinateur effectuant la simulation),
- obtenir les mêmes résultats sur plusieurs simulations (en ayant des entrées différentes ou aléatoires).

Un autre point important est d'utiliser l'abstraction avec prudence. Une simulation avec abstraction est plus rapide et plus simple mais, en absence de preuve mathématique qui la justifie, elle doit être validée par une autre simulation plus étendue.

Lors de l'analyse des résultats de simulation, il faut tenir compte de trois aspects pour émettre des conclusions: la vérification, la validation et l'accréditation. La vérification permet d'éliminer certains modèles à cause d'erreurs détectées dans son implémentation tandis que la validation indique le niveau de correspondance du modèle avec les phénomènes réels qu'il doit représenter. L'accréditation, quant à elle, doit prouver avec certitude que le modèle est directement applicable sur le terrain.

### 2.1.2 Revue des outils de simulation

#### Principes généraux

Les logiciels de simulation se consacrent généralement à l'étude d'une couche réseau spécifique et diffèrent par les technologies, les composantes ou les protocoles supportés. Comme il existe plusieurs types de réseaux et un grand nombre de paramètres pouvant être analysés lors d'une simulation, le choix du logiciel approprié peut s'avérer complexe. Il est donc nécessaire de déterminer au préalable les paramètres dont le simulateur doit tenir compte. En voici une liste non exhaustive :

- topologie de réseaux supportés (transparents, opaques, en anneaux, maillés,...),
- prise en compte des contraintes physiques (dispersion, atténuation,...),

- protocoles supportés,
- analyses possibles (taux d'erreur sur les bits, probabilité de blocage, analyse du trafic, routage et assignation de longueurs d'onde, ...),
- niveau(x) d'abstraction possible,
- outils de développement de réseaux disponibles,
- composantes supportées.

Les outils de simulation de réseaux optiques se définissent en deux classes distinctes nommées : centré optique et centré réseau. Le simulateur centré réseau fait abstraction de la couche physique et étudie les transmissions à la couche 2 et/ou 3. Il est « *utilisé principalement pour tester différents designs selon un protocole, une topologie ou une qualité de service spécifique d'un réseau* » (Troxel *et al.*, 2003). Il fonctionne généralement soit avec la méthode analytique, soit avec la simulation par événements discrets. La méthode analytique utilise des équations mathématiques pour effectuer la simulation du réseau. Elle est plus rapide mais ses résultats sont généralement moins précis que la simulation par événement discret. Cette dernière analyse plutôt la transmission paquet par paquet. C'est beaucoup plus long parce qu'elle requiert un grand nombre de calculs pour un temps de simulation réel très court. Par contre, son analyse est beaucoup plus étendue.

Quant au simulateur centré optique, il fait abstraction des couches supérieures à la couche physique. Il est utilisé pour étudier les contraintes physiques des composantes du réseau. Il permet d'étudier l'impact de certains phénomènes physiques (dispersion, atténuation, etc.) et de différentes composantes et technologies sur la qualité du signal d'une liaison optique.

Dans la première phase de création d'architecture des réseaux optiques sans filtre, un simulateur centré optique sera nécessaire pour valider les architectures. En effet, l'utilisation de diviseurs optiques passifs dans des réseaux longue distance amène de nouvelles considérations au niveau des contraintes physiques qui doivent être évaluées. Par contre, la simulation de la couche physique n'entre pas dans le cadre de ce mémoire.

## Principaux simulateurs utilisés

Parmi les simulateurs disponibles sur le marché, il y en certains qui, par leurs fréquentes apparitions dans des articles scientifiques ou leur grande prévalence tant dans l'industrie que dans les universités, offrent une solution éprouvée. La section suivante contient un bref survol de trois simulateurs de ce type, soient : OPNET®, le simulateur NS-2 et VPIsystems®.

### OPNET®

La compagnie OPNET® fournit des outils de développement, d'administration et de contrôle pour un grand nombre de technologies de réseaux. Ils sont destinés aux industries, aux fournisseurs Internet, à la défense et à la recherche scientifique. La plateforme de simulation de réseaux, largement utilisée sur le marché, offre une gamme étendue de simulations possibles allant de la simulation d'un simple réseau LAN à celle d'un réseau satellite complet. Les transmissions sont analysées par la méthode de simulation par événements discrets.

Les réseaux optiques WDM peuvent être intégrés dans l'environnement OPNET® en utilisant *SP Guru Transport Planner™*. Ce logiciel, destiné aux fournisseurs Internet et aux équipementiers, permet le développement et l'analyse des réseaux optiques tant opaques que transparents. Plus spécifiquement, il effectue le routage et l'assignation des longueurs d'onde en plus d'évaluer plusieurs schèmes de protection. Par contre, il n'est pas possible d'y évaluer les contraintes physiques d'une liaison optique (OPNET Technologies, 2008).

### Le simulateur NS-2

Le simulateur NS-2 est très utilisé en recherche scientifique et offre une alternative à OPNET®. De plus, il est gratuit et toujours supporté par ses concepteurs. Tout comme OPNET®, il opère une simulation par événements discrets et ne prend pas en compte les

contraintes physiques des liaisons optiques. Par contre, ce simulateur ne supporte pas encore les transmissions optiques WDM, les librairies doivent donc y être créées. Comme il nécessite un apport en développement par ses utilisateurs, il offre une solution plus difficile d'intégration que celle de ses concurrents commerciaux (Korniak et Rózycki, 2006).

## **VPIsystems®**

L'environnement VPIsystems® contient une suite de logiciels qui permettent une analyse sur plusieurs couches des réseaux optiques. Ces logiciels effectuent la simulation de liaisons optiques et le développement de réseaux par une approche multicouche. Plusieurs technologies, composantes et protocoles y sont supportés. Certains des logiciels de la suite sont destinés exclusivement à l'analyse et la simulation d'une couche réseau, d'un protocole ou d'un type de réseau particulier; d'autres servent plutôt à concevoir ou à optimiser les réseaux optiques. Il y a donc possibilité d'une simulation de réseau à la fois centrée optique et centrée réseau. Par exemple, *VPItransmissionMaker™* simule la couche physique des liens optiques en considérant les différentes contraintes physiques; tandis que *OnePlanTransport™* se concentre à l'analyse de la couche transport du réseau (VPIsystems, 2008).

### **2.1.3 Logiciel Nortel NetCalc Optical Planner™**

Nortel® est une compagnie de télécommunication qui offre plusieurs types de solutions réseau. Pour accompagner les concepteurs de réseaux dans le développement, le déploiement et la gestion de ses équipements de transmission, une suite de logiciels de simulation pour réseau optique WDM a été conçue. Cette suite se compose de trois logiciels qui analysent chacun un aspect précis des réseaux optiques WDM.

Ainsi, *NetCalc Optical Modeler™* simule les transmissions sur la couche physique tandis que *NetCalc Optical Planner™* facilite le développement de réseaux optiques. *NetCalc Data Planner™*, quant à lui, analyse le trafic des couches supérieures pour divers protocoles.

## NetCalc Optical Planner™

Le logiciel *NetCalc Optical Planner™* est un outil de soutien à la création de réseaux optiques WDM. Il effectue le routage et l'assignation de longueurs d'onde des réseaux optiques WDM en plus de générer plusieurs rapports sur les caractéristiques des réseaux créés. Il est aussi possible d'y faire un scénario d'accroissement des demandes sur plusieurs années pour ainsi tester le comportement du réseau selon différents trafics (Nortel Networks, 2006).

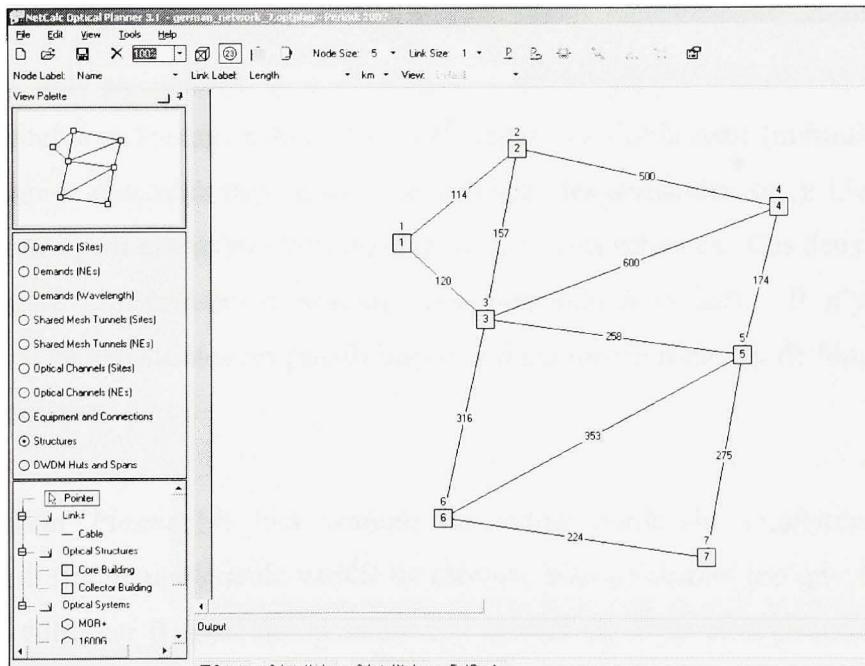


Figure 2.1 Interface graphique de *NetCalc Optical Planner™*.

L'interface graphique du logiciel *NetCalc Optical Planner™* offre une représentation par couche évoquant les différentes étapes de création d'une solution réseau (figure 2.1). Ainsi, sur la première couche, l'utilisateur crée manuellement la structure du réseau ou en importe une d'un autre logiciel. Sur la couche suivante, les composantes et les commutateurs sont intégrés à l'intérieur des nœuds. D'autres couches permettent ensuite de déterminer le type de protection du réseau. Finalement, sur la dernière couche, les demandes entre les nœuds sous

forme de longueurs d'onde (ou de fractions de longueur d'onde) sont ajoutées par l'utilisateur.

Le logiciel génère ensuite les chemins primaires (chemins par défaut) et secondaires (chemins de protection) des demandes, le prix du réseau, la congestion sur les liens, l'emplacement des nœuds de régénération et d'autres caractéristiques du réseau créé. Par contre, les contraintes physiques liées à une connexion ne sont pas évaluées par le logiciel et ne peuvent donc pas influencer le routage des demandes (sauf dans le cas de l'atténuation du signal, évaluée pour déterminer si la connexion nécessite un régénérateur).

En ce qui a trait au routage et à l'assignation de longueurs d'onde, *NetCalc Optical Planner*<sup>TM</sup> effectue un routage selon un objectif choisi par l'utilisateur (minimiser le coût du réseau, minimiser le nombre de noeuds intermédiaires des demandes, etc.). L'assignation de longueurs d'onde peut elle aussi s'effectuer selon différents schèmes. Ces deux opérations se font de manière séquentielle, c'est-à-dire une demande à la fois. Il n'y a donc pas d'évaluation globale de toutes les possibilités d'assignation de routes et de longueurs d'onde avant l'assignation.

*NetCalc Optical Planner*<sup>TM</sup>, tout comme les autres outils de simulation mentionnés précédemment, simule une grande variété de réseaux mais ne permet pas une intégration des réseaux sans filtre car il n'est pas possible d'y ajouter de diviseurs optiques passifs et de définir des arbres de fibres. Par contre, les types de simulation et d'analyse de *NetCalc Optical Planner*<sup>TM</sup> ou de *SP Guru Transport Planner*<sup>TM</sup> correspondent globalement à ce qui doit être réalisé par l'outil de simulation des réseaux optiques sans filtre.

## 2.2 Solution proposée

Comme l'architecture des réseaux optiques sans filtre est unique, elle ne peut être intégrée dans les outils de conception et de simulation existants. Pour cette raison, les membres de l'équipe de recherche sur les réseaux optiques sans filtre ont donc conçu une plateforme de

conception et de simulation adaptée à ces réseaux. Les sections suivantes expliquent le fonctionnement général de cette plateforme.

Un diagramme complet du processus de conception, de simulation et de validation d'une solution sans filtre est inclus dans l'annexe I. Ce diagramme comprend aussi les étapes de simulation des couches optiques et réseaux, ce qui n'est pas à l'étude dans ce mémoire.

### **2.2.1 Environnement de développement MATLAB®**

Les principales fonctions de l'environnement de développement MATLAB® sont l'exécution de calculs mathématiques, l'analyse et la visualisation des données et l'écriture de nouveaux logiciels (MATLAB, 2008). De plus, il contient une grande librairie de fonctions prédéfinies que ce soit dans le domaine de la réseautique, de la programmation linéaire ou des mathématiques avancés. Dans cet environnement de développement, il est possible de créer des fichiers exécutables. Ces fichiers sont faciles d'utilisation car la programmation bas niveau n'y est pas obligatoire (déclaration de variables, allocation de la mémoire, etc.). De plus, lorsqu'il y a des erreurs dans le code, MATLAB® fournit plusieurs méthodes de débogage, ce qui diminue grandement le temps consacré à détecter et corriger les erreurs. Pour ces raisons, la plateforme de conception et de simulation des réseaux optiques sans filtre a été créé dans l'environnement de développement MATLAB®.

Par contre, il n'est pas exclu qu'après avoir créé des algorithmes fonctionnels, le code soit transféré dans un autre langage de programmation. La principale raison est que les logiciels créés et exécutés dans l'environnement de développement MATLAB® sont généralement moins performants en terme de temps de calcul que des logiciels développés en langage C ou C++ par exemple.

### **2.2.2 Tâches effectuées**

Dans les réseaux optiques traditionnels, les demandes sont routées sur l'ensemble des liens selon les connexions internes des commutateurs. Les objectifs des outils de développement

sont d'assurer une connectivité pour chacune des demandes, de diminuer les coûts globaux du réseau, et dans certains cas de prévoir une protection des demandes. Tout cela à l'intérieur des limites physiques d'une transmission optique (nombre maximal de longueurs d'onde sur un lien, budget de puissance, etc.) et d'une capacité limite de commutation des composantes.

La plateforme de conception et de simulation des réseaux optiques sans filtre fonctionne de manière différente. En effet, elle conçoit tout d'abord l'architecture des arbres de fibres de manière à satisfaire une pleine connectivité entre les nœuds et d'optimiser certains paramètres (protection, longueur moyenne des demandes, etc.). Puis, un trafic est simulé sur le réseau. Le routage et l'assignation de longueurs d'onde sont ensuite réalisés selon les caractéristiques des demandes et l'architecture de la solution sans filtre. Finalement, les résultats concernant les caractéristiques du réseau sans filtre, le routage et l'assignation de longueurs d'onde sont générés sous forme de rapports. La solution sans filtre est aussi affichée graphiquement pour une meilleure compréhension du réseau. De plus, un module de placement de bloqueurs de longueurs d'onde est inclus dans la plateforme. Il offre la possibilité de trouver les meilleurs emplacements pour les bloqueurs selon l'architecture de la solution et les routes des demandes.

La plateforme de conception et de simulation n'évalue pas les caractéristiques de transmission du signal au niveau de la couche physique. Les algorithmes de création de l'architecture et de routage considèrent néanmoins la portée maximale de transmission comme contrainte lors de l'élaboration des arbres de fibres et le choix des chemins optiques.

### 2.2.3 Paramètres entrants

L'utilisateur de la plateforme de conception et de simulation des réseaux optiques WDM doit tout d'abord créer la topologie du réseau en spécifiant les informations relatives aux nœuds et aux liens du réseau (position des nœuds, longueur des liens, nombre de contacts par nœuds,

etc.). Dans une phase ultérieure du projet, il sera possible de créer des réseaux par une interface graphique utilisateur et par un module de création de réseaux aléatoires.

Après, les demandes sont insérées sous forme de matrice contenant la capacité requise entre chacun des nœuds. Différentes options sont ensuite offertes à l'utilisateur pour lui permettre de personnaliser la simulation. Par exemple, l'affichage des arbres de fibres et du réseau entier ou la génération de rapports concernant des aspects précis de la simulation. Lorsque le module de placement des bloqueurs de longueurs d'onde est utilisé, le nombre de bloqueurs à insérer sur le réseau est spécifié avant l'optimisation.

#### 2.2.4 Affichage des résultats

L'analyse d'une solution réseau, peu importe la technologie optique utilisée, se base généralement sur certains paramètres principaux comme par exemple le nombre de longueurs d'onde utilisées, la longueur moyenne des demandes ou la longueur totale des fibres utilisées. La plateforme de conception et de simulation produit donc des résultats permettant de comparer ce type de réseau avec les réseaux traditionnels. Pour ce faire, les rapports générés s'apparentent à ceux du logiciel *NetCalc Optical Planner™*. De plus, un rapport contenant les caractéristiques exclusives aux réseaux optiques sans filtre est créé. Il renferme notamment les caractéristiques de chacun des arbres de fibres d'une solution (nombre de demandes supportées, longueur, etc.). L'annexe II contient un exemple des rapports conçus par la plateforme de conception et de simulation des réseaux optiques sans filtre.

Le coût global du réseau selon le nombre de diviseurs optiques passifs et de bloqueurs de longueurs d'onde est aussi inclus dans les résultats. Finalement, le réseau entier (figure 2.2) et les arbres de fibres le composant (figure 2.3) sont représentés graphiquement.

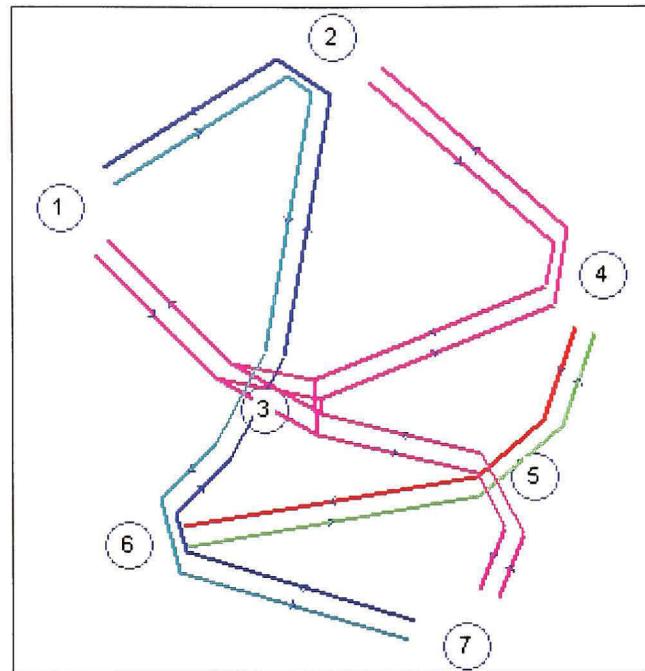


Figure 2.2 *Représentation du réseau sans filtre complet.*

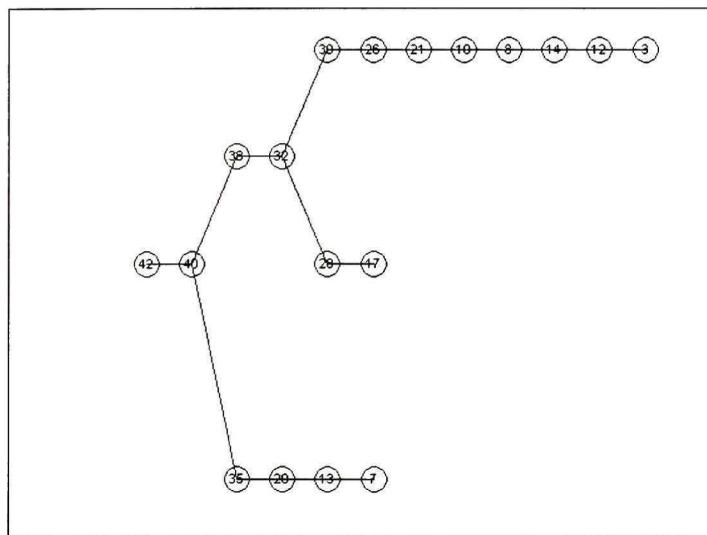


Figure 2.3 *Représentation par contacts d'un arbre de fibres d'une solution sans filtre.*

## CHAPITRE 3

### PRINCIPES DE CONCEPTION ET DE SIMULATION

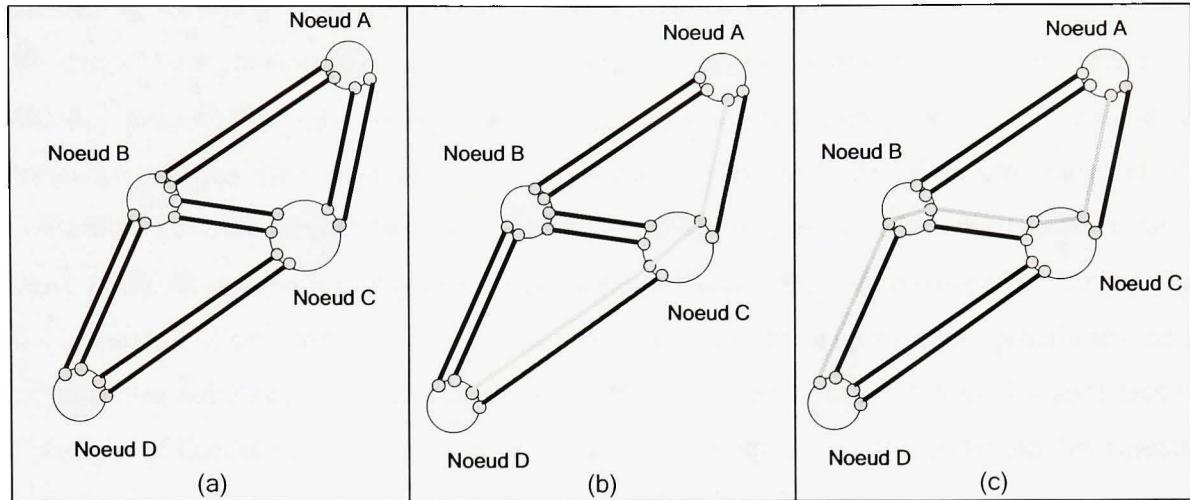
#### 3.1 Conception d'une architecture sans filtre et routage des demandes

La première étape de l'élaboration d'une solution sans filtre est la conception de l'architecture. Elle est réalisée à l'aide d'outils de calcul inclus dans la plateforme de conception et de simulation des réseaux optiques sans filtre. L'étude approfondie de ces outils n'entre pas dans le cadre de ce mémoire, mais leur fonctionnement général est expliqué dans la prochaine section pour permettre de mieux comprendre à la fois la technologie sans filtre et l'étendue des capacités de la plateforme de conception et de simulation.

##### 3.1.1 Introduction à la création d'arbres de fibres et au routage

Le routage des demandes sur les réseaux optiques sans filtre est étroitement lié à la création des arbres de fibres. En effet, à partir des demandes devant être satisfaites sur le réseau et des données de topologie du réseau, l'outil de conception de réseaux optiques sans filtre crée une architecture en établissant des connexions entre les fibres optiques. Les routes des demandes sont donc limitées par les arbres de fibres de l'architecture.

La figure 3.1 (a) montre un réseau à quatre nœuds interreliés par des paires de fibres optiques. Dans cet exemple, la connexion entre les nœuds A et D doit être réalisée par la technologie sans filtre. Les réseaux sans filtre 3.1 (b) et 3.1 (c) représentent deux solutions différentes à ce problème. Comme les arbres de fibres sont différents, les paramètres physiques des solutions le sont aussi. Par exemple, l'arbre de fibres (en gris) de la figure 3.1 (c) est formé de plus de liens que l'arbre de fibres de la figure 3.1 (b). De plus, la création d'un arbre de fibres sur le réseau sans filtre influence l'architecture des autres arbres du réseau car il limite les liens disponibles pour les y établir.



**Figure 3.1 Arbres de fibres d'un réseau à quatre nœuds.**

En ce qui a trait au routage des demandes, il est évident qu'il n'est pas le même pour la solution 3.1 (b) et la solution 3.1 (c). Par conséquent, le routage est dépendant de l'architecture du réseau.

La longueur moyenne des demandes et le nombre moyen de segments (un segment étant un lien optique entre deux nœuds) par demande sont des paramètres classiques de comparaison entre les réseaux optiques WDM. À cause des limitations créées par les arbres de fibres, ces deux paramètres sont généralement supérieurs dans les réseaux sans filtre comparés à ceux des réseaux traditionnels.

### 3.1.2 Algorithmes de création d'arbres de fibres

Les détails entourant l'élaboration et la validation d'algorithmes de création d'une architecture sans filtre ne sont pas couverts dans ce mémoire. Par contre, certains principes sont énoncés dans cette section pour permettre une meilleure compréhension de l'exercice de conception d'un réseau optique sans filtre.

Tel que vu à la figure 3.1, l'architecture d'un réseau sans filtre est définie par l'agencement des connexions internes des nœuds. Les possibilités de connexions pour un réseau qui contient plusieurs nœuds et liens sont donc extrêmement nombreuses. Pour obtenir la meilleure solution sans filtre possible, il faut utiliser des outils de calcul qui, sans évaluer l'ensemble des solutions existantes, optimisent la solution dans un temps relativement court. Deux outils de conception employant des métaheuristiques ont été développés pour générer des solutions d'architecture. Ces deux outils utilisent les algorithmes génétiques pour élaborer des solutions sans filtre mais leur mode d'opération est différent. Ce sont Benoît Châtelain et Daniel O'Brien, tous deux membres de l'équipe de recherche sur les réseaux optiques sans filtre, qui ont développé ces outils (Châtelain, 2008).

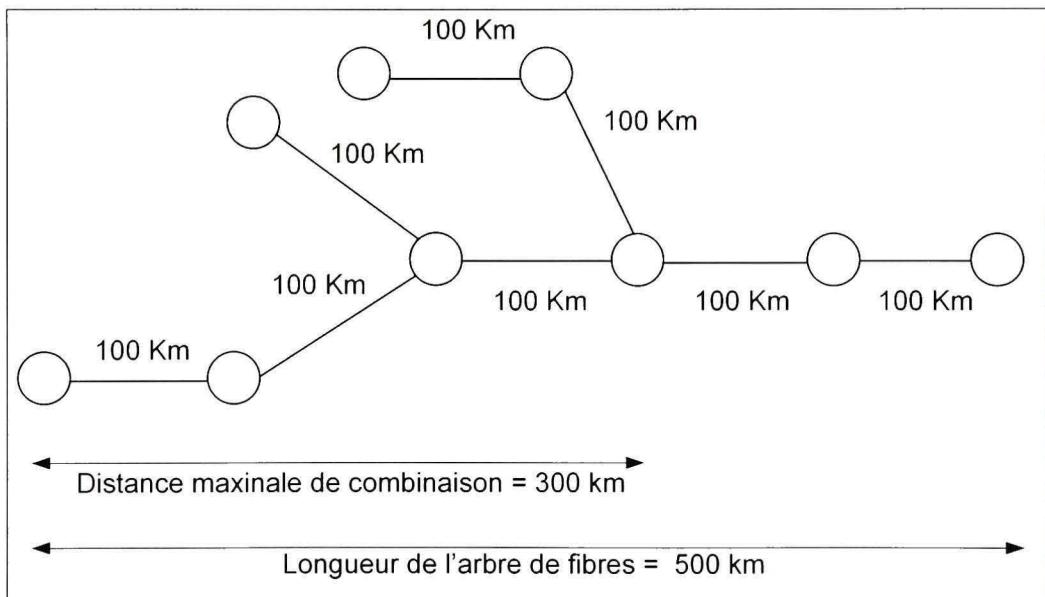
Le premier outil de conception génère une solution à partir de la connectivité interne des nœuds. Son objectif est d'obtenir une solution d'architecture qui puisse satisfaire toutes les demandes entre les nœuds en plus de maximiser le nombre de connexions protégées. Une demande est protégée lorsqu'il existe deux chemins optiques indépendants pour assurer la connexion. De plus, les contraintes de longueur maximale des arbres de fibres et de distance maximale de combinaison du signal sont prises en compte lors de la conception.

Le deuxième outil de conception fonctionne plutôt en assignant chaque fibre à un arbre de fibres et en modifiant ensuite cette assignation pour générer une solution d'architecture qui assure une connectivité complète entre les nœuds. La longueur maximale des arbres de fibres est fixée par l'utilisateur. Les objectifs de cette optimisation sont d'assurer une pleine connectivité entre les nœuds en plus de réduire la longueur des chemins pour les connexions.

## **Paramètres de création de l'architecture**

Lors de la création des arbres de fibres, il faut tenir compte de certaines contraintes physiques propres à la transmission par fibre optique. Par exemple, la longueur des arbres de fibres est limitée par l'atténuation en puissance du signal. Une autre contrainte apparaît lorsque sont insérés sur le réseau des diviseurs optiques passifs pour combiner le signal. En effet, lorsque

deux fibres optiques sont combinées dans un diviseur optique passif, les signaux présents sur chacune des fibres s'additionnent. Donc, une distance maximale de combinaison est déterminée pour empêcher que la combinaison du signal n'entraîne une trop grande dégradation du rapport signal sur bruit optique (OSNR). Cette distance maximale est calculée à partir de l'origine de la plus longue branche de l'arbre de fibres jusqu'au diviseur optique passif qui combine le signal le plus loin en aval (voir figure 3.2). Comme la distance maximale de combinaison d'une architecture sans filtre n'est pas encore exactement définie, cette contrainte n'est pas considérée pour le moment lors du choix d'une solution sans filtre.



**Figure 3.2 Distance maximale de combinaison d'un arbre de fibres.**

### Régénération du signal

Dans la première phase d'étude des réseaux optiques sans filtre, une longueur d'arbres de fibres maximale de 1500 km est fixée comme contrainte principale lors de la création des arbres de fibre sans régénérateur de signal. Dans une phase ultérieure, la régénération par canal et l'incorporation de nœuds régénérateurs seront étudiées et ce, dans le but d'augmenter la portée des réseaux optiques sans filtre.

## Protection

La protection des connexions est cruciale lors de la conception d'une architecture de réseau. Comme les nœuds des réseaux optiques sans filtre sont passifs, il n'est pas possible de modifier de façon active la route d'une connexion pour remédier à un bris sur la ligne. La modification du tracé d'un arbre de fibres n'est pas non plus une solution viable puisque cela affecte l'ensemble des demandes sur cet arbre. Par contre, à cause de l'architecture des réseaux optiques sans filtre, un nombre plus ou moins grand de demandes sont protégées automatiquement. Le problème est d'assurer la protection des demandes restantes.

Différentes techniques sont possibles pour protéger l'ensemble des demandes dans un réseau optique sans filtre (Châtelain, 2008). Ils consistent à :

- ajouter des liens optiques entre les nœuds,
- ajouter des bloqueurs de longueurs d'onde ou des commutateurs optiques (solutions avec composantes actives),
- créer un réseau sans filtre de protection superposé au réseau de connexions primaires,
- assurer la protection des demandes sur une couche plus élevée du réseau.

Une étude complète sur les attributs de chacun des schèmes de protection doit être réalisée pour répondre à ce problème majeur propre aux réseaux optiques sans filtre.

### 3.2 Assignation de longueurs d'onde

Une fois la création de l'architecture sans filtre et le routage des demandes effectués, la prochaine étape est d'attribuer une longueur d'onde à chacune des demandes. L'objectif lors de cette assignation est d'utiliser le moins possible de longueurs d'onde, le nombre de longueurs d'onde sur une fibre étant limité. Dans le cas des réseaux optiques sans filtre, l'outil d'assignation de longueurs d'onde doit tenir compte des particularités propres à cette topologie.

En effet, l'architecture spécifique des réseaux optiques sans filtre fait en sorte qu'une longueur d'onde attribuée à un arbre de fibres se retrouve sur un grand nombre de liens. Contrairement aux réseaux optiques traditionnels, les longueurs d'onde ne sont pas commutées individuellement dans les nœuds; elles sont plutôt dirigées sur les liens en aval selon l'agencement des diviseurs optiques passifs. L'assignation de longueurs d'onde est donc réalisée en considérant l'architecture des réseaux optiques sans filtre.

Dans les réseaux optiques traditionnels, des dispositifs comme les bloqueurs ou les OADM permettent la réutilisation des longueurs d'onde. Les ressources du réseau sont alors maximisées. Par contre, les réseaux optiques sans filtre de base ne contiennent pas de composantes pouvant bloquer les longueurs d'onde, ce qui augmente sensiblement la congestion des liens.

### 3.2.1 Algorithmes

Les algorithmes d'assignation de longueurs d'onde ont comme objectif principal de minimiser le nombre de longueurs d'onde utilisées. La technique employée par l'outil de simulation des réseaux optiques sans filtre est de type combinatoire, c'est-à-dire que tous les chemins optiques sont connus avant l'assignation. Pour réaliser l'assignation, une matrice de conflits entre les demandes est tout d'abord générée (un conflit étant créé par deux demandes routées sur le même lien). Les dimensions de cette matrice correspondent au nombre total de demandes sur le réseau. Ainsi, il est possible de connaître, pour une demande, toutes les autres demandes qui entrent en conflit avec elle.

L'algorithme d'assignation agence donc les longueurs d'onde en tenant compte des conflits entre les demandes et en minimisant le nombre de longueurs d'onde du réseau. Ce problème se traduit en coloriage de graphe, qui est largement étudié dans la littérature (Robin, 1986). Le but du coloriage de graphe est d'assigner une couleur différente à tous les nœuds d'un graphe qui sont reliés directement par un lien et ce, en minimisant le nombre de couleurs. Dans le cas de l'assignation de longueurs d'onde, les couleurs représentent les longueurs

d'onde et les nœuds représentent les demandes. Ainsi, lorsque deux demandes sont en conflit, il existe un lien entre les deux nœuds dans le graphe.

Pour trouver une solution à l'assignation de longueurs d'onde sur des réseaux optiques à plusieurs nœuds, des algorithmes d'optimisation métaheuristiques sont utilisés puisqu'il existe un très grand nombre de possibilités d'assignation et qu'elles ne peuvent être toutes évaluées dans un temps de calcul raisonnable (problème NP-complet). La métaheuristique utilisée pour effectuer l'assignation est la recherche Tabou. C'est Daniel O'Brien, membre du groupe de recherche sur les réseaux optiques sans filtre, qui a programmé cette métaheuristique. Le principe général est de réduire graduellement le nombre de solutions pour obtenir une solution finale qui minimise la fonction objective (Hertz et de Werra, 1987).

Pour réaliser cette optimisation, une solution initiale fonctionnelle est d'abord déterminée. Des solutions légèrement différentes de celle-ci sont ensuite générées pour ainsi explorer le voisinage de la solution initiale. Ces solutions voisines sont évaluées selon l'objectif d'optimisation et la solution qui s'en rapproche le plus est conservée. Les modifications pour passer de la solution conservée à la solution initiale sont ensuite placées dans une liste de mouvements interdits (liste de solutions taboues) ce qui empêche le retour aux solutions précédentes. Ces étapes sont ensuite répétées en prenant à chacune des itérations la solution conservée comme solution initiale. La liste de solutions taboues contient des mouvements interdits en nombre fixe qui sont mis à jour à chaque itération. La solution finale est celle qui minimise le plus la fonction objective à la fin des itérations.

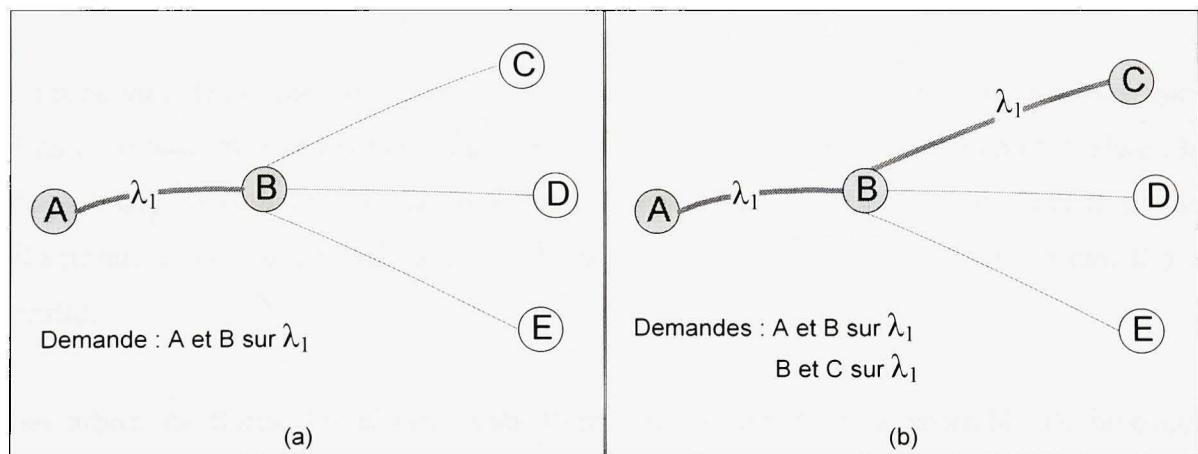
Il est aussi possible de résoudre de façon séquentielle le problème d'assignation des longueurs d'onde comme le fait, par exemple, *NetCal Optical Planner*<sup>TM</sup>. Cette technique consiste à traiter les demandes une à la suite de l'autre en tenant compte de la distribution des demandes déjà placées sur le réseau. Le temps de calcul des algorithmes séquentiels comparé à celui d'une méthode combinatoire est de beaucoup diminué et les algorithmes sont aussi plus simples à réaliser. De plus, les résultats obtenus pour des réseaux faiblement congestionnés s'apparentent à ceux des méthodes combinatoires. Par contre, pour des

réseaux lourdement congestionnés, les performances des algorithmes séquentiels dépendent grandement de l'ordre de traitement des demandes (Mukherjee, 2006). Pour le moment, la plateforme de conception et de simulation n'emploie que la méthode combinatoire d'assignation des longueurs d'onde.

### 3.2.2 Création de la matrice de conflit

#### Division de signal

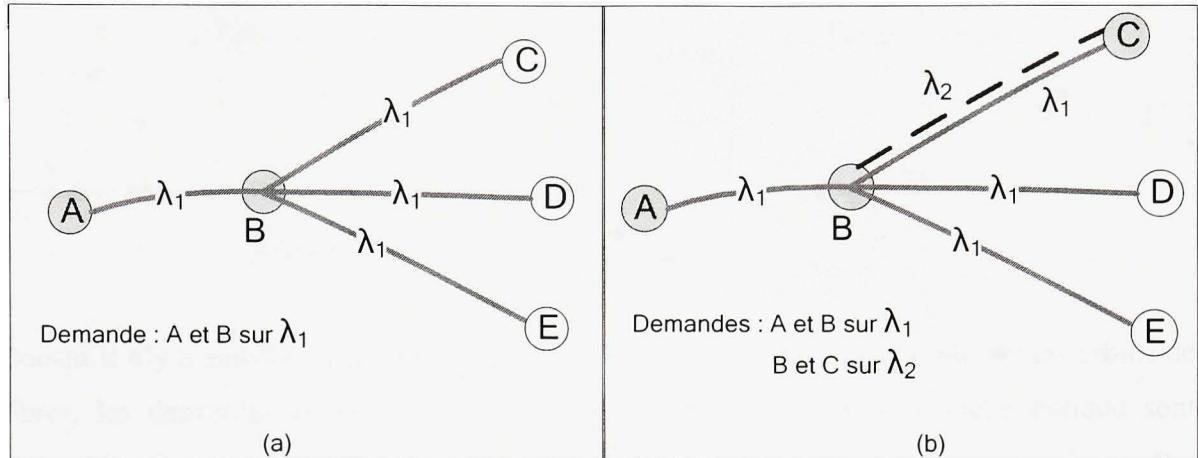
Dans un réseau optique sans filtre, il n'y a pratiquement aucune barrière à la propagation des longueurs d'onde sur les arbres de fibres. Dans le cas des réseaux opaques, les nœuds contiennent des régénérateurs pouvant bloquer le signal optique.



**Figure 3.3** *Assignation de longueurs d'onde dans un réseau opaque.*

La figure 3.3 représente un réseau opaque à cinq nœuds. La demande entre les nœuds A et B est satisfaite par la longueur d'onde  $\lambda_1$  sur le lien AB. Après le nœud de destination de la demande (B),  $\lambda_1$  peut être réutilisée pour une ou plusieurs autres demandes, notamment celle entre les nœuds B et C (figure 3.3 (b)). Par contre, dans les réseaux optiques sans filtre, la longueur d'onde  $\lambda_1$  est propagée sur les liens du réseau en aval du nœud B car ce nœud est seulement constitué de diviseurs optiques passifs (figure 3.4 (a)). La demande entre les

nœuds B et C ne peut donc pas être satisfaite par  $\lambda_1$ ; une autre longueur d'onde ( $\lambda_2$ ) est alors ajoutée (figure 3.4 (b)) sur le lien BC.

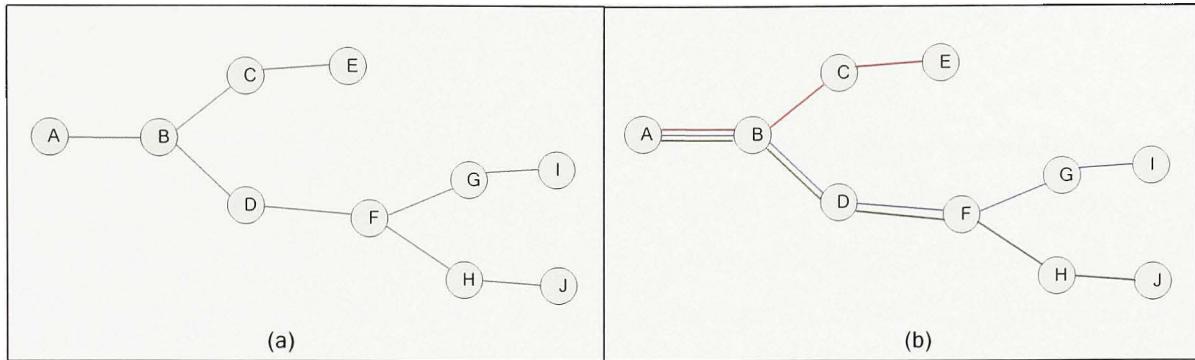


**Figure 3.4** *Attribution de longueurs d'onde dans un réseau optique sans filtre.*

Comme vu à la section précédente, la météohéuristique utilisée pour assigner les longueurs d'onde se base sur une matrice de conflit. Un algorithme crée cette matrice en évaluant la disposition des demandes et la configuration des arbres de fibres. Son objectif est de déterminer si les connexions passent par des liens optiques communs. Dans ce cas, il y a conflit.

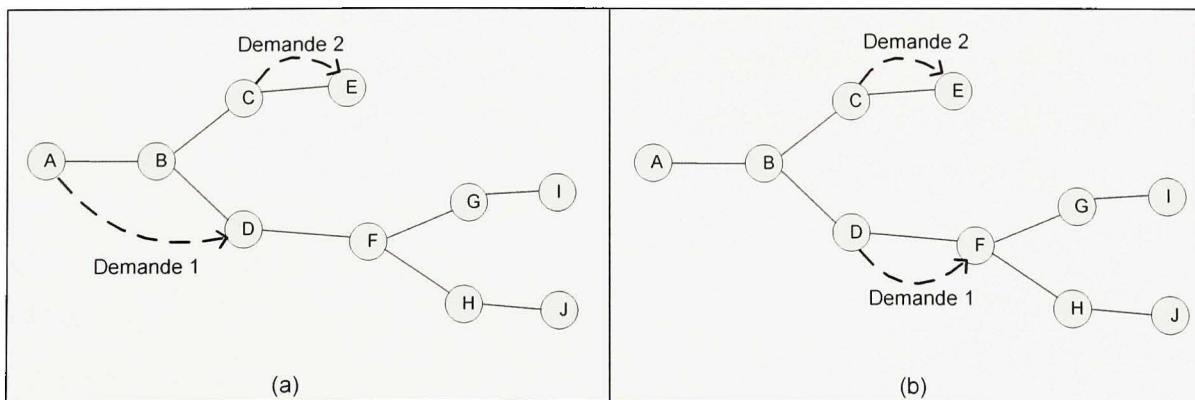
Les arbres de fibres des réseaux sans filtre sont constitués d'un ensemble de branches optiques. Une branche optique est définie comme étant la section de fibre délimitée entre une origine et une destinations d'un arbre de fibres. Cette appellation ne se réfère à aucune étude antérieure; elle permet d'expliquer plus simplement l'attribution des longueurs d'onde dans un réseau optique sans filtre.

L'arbre de fibres de la figure 3.5 (a) contient les trois branches optiques suivantes : [A-E], [A-I] et [A-J] (nommées selon les deux extrémités de la branche). Il est possible que plusieurs branches optiques occupent un même lien. La figure 3.5 (b) permet de différencier les trois branches de l'arbre de fibres car elles sont identifiées d'une couleur différente.



**Figure 3.5 Arbre de fibres d'une solution sans filtre.**

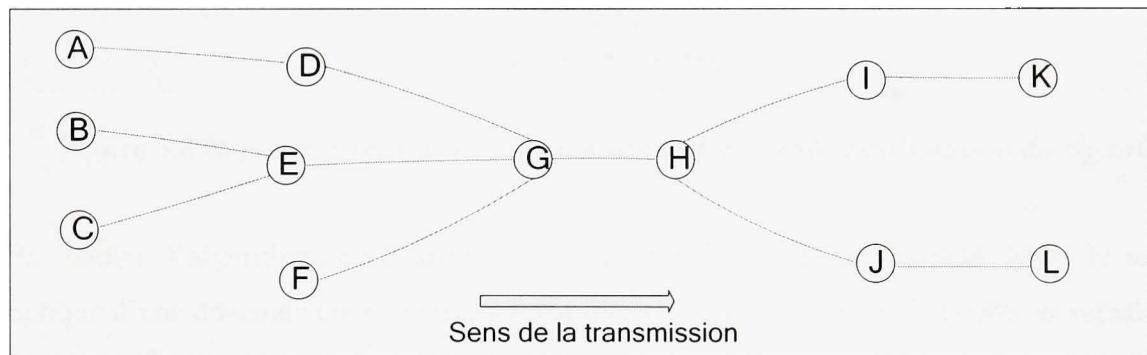
Lorsqu'il n'y a aucune barrière physique pour stopper les longueurs d'onde sur les arbres de fibres, les demandes dont les origines se retrouvent sur la même branche optique sont automatiquement en conflit parce qu'elles partagent assurément un lien sur le réseau. Par exemple, à la figure 3.6 (a), l'origine de la demande 1 est située au contact A et celle de la demande 2 au contact C. Les deux origines sont donc sur la même branche optique [A-E] ce qui empêche l'assignation d'une même longueur d'onde pour ces deux demandes. Sur la figure 3.6 (b), l'origine de la demande 1 (contact D) est située sur les branches optiques [A-I] et [A-J] tandis que l'origine de la demande 2 (contact C) se retrouve sur la branche [A-E]; il n'y a donc pas de conflit entre ces deux demandes et elles peuvent occuper la même longueur d'onde.



**Figure 3.6 Différentes demandes sur un même arbre de fibres.**

## Combinaison du signal

L'ajout de diviseurs optiques passifs qui combinent le signal optique amène de nouvelles considérations lors de l'assignation de longueurs d'onde. En effet, dans les réseaux qui ne combinent pas le signal, les arbres de fibres n'ont qu'une seule origine. Par contre, lorsque la combinaison du signal est permise, les arbres de fibres peuvent avoir plus d'une origine. À la figure 3.7, l'arbre de fibres a quatre origines (contacts A, B, C et F). L'algorithme qui évalue les conflits entre les demandes doit donc être modifié pour tenir compte de cette nouvelle architecture.

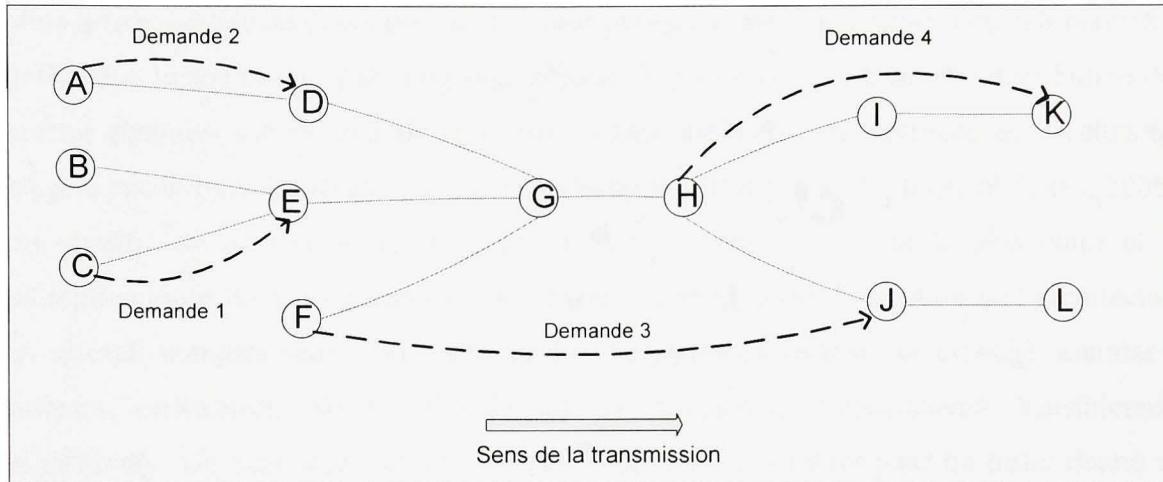


**Figure 3.7 Arbre de fibres avec combinaison du signal optique.**

Le principe émanant de la jonction de deux fibres est qu'il ne peut y avoir de l'information transigeant sur la même longueur d'onde dans chacune des fibres jointes. Lorsque ce principe n'est pas respecté, il y a alors une perte de l'information contenue dans les deux longueurs d'onde. Il y a par contre une exception à cette règle. En effet, dans le cas où les demandes sur chacune des fibres auraient comme destination un contact situé en amont du diviseur optique passif qui combine le signal, les demandes ne seraient pas en conflit (demandes 1 et 2 sur la figure 3.8).

Pour réaliser l'assignation de longueurs d'onde dans un réseau optique sans filtre avec combinaison du signal optique, les demandes sont aussi associées à une ou plusieurs branches optiques. Comme dans le cas sans combinaison, les demandes dont les origines se

retrouvent sur la même branche optique sont en conflit, par exemple les demandes 1 et 4 sur la figure 3.8 (branche [A-K]).



**Figure 3.8 Demandes satisfaites sur un arbre de fibres avec combinaison du signal.**

Par contre, l'algorithme doit aussi dresser la liste des liens par lesquels passe le signal optique d'une demande car de nouveaux conflits sont créés par la combinaison du signal. Par exemple, les origines des demandes 2 et 3 de la figure 3.8 ne se retrouvent pas sur la même branche optique. Par contre, la longueur d'onde de la demande 2 est propagée sur le lien GH qui est aussi occupé par la longueur d'onde de la demande 3. Ces deux demandes ne peuvent donc pas se voir attribuer la même longueur d'onde.

Une fois la matrice de conflit créée, l'assignation de longueurs d'onde est effectuée. Ensuite, différents rapports concernant les caractéristiques du réseau optique sans filtre pour le trafic simulé sont générés. Si nécessaire, des bloqueurs de longueurs d'onde peuvent alors être ajoutés sur le réseau par le module de placement inclus dans la plateforme.

### 3.3 Placement des bloqueurs de longueurs d'onde

Les sections précédentes soulignent le fait qu'un plus grand nombre de longueurs d'onde est utilisé dans les réseaux optiques sans filtre comparativement aux réseaux optiques

traditionnels. Comme le nombre de longueurs d'onde possibles sur un lien optique est limité, différentes stratégies doivent être envisagées pour assurer le respect de cette règle.

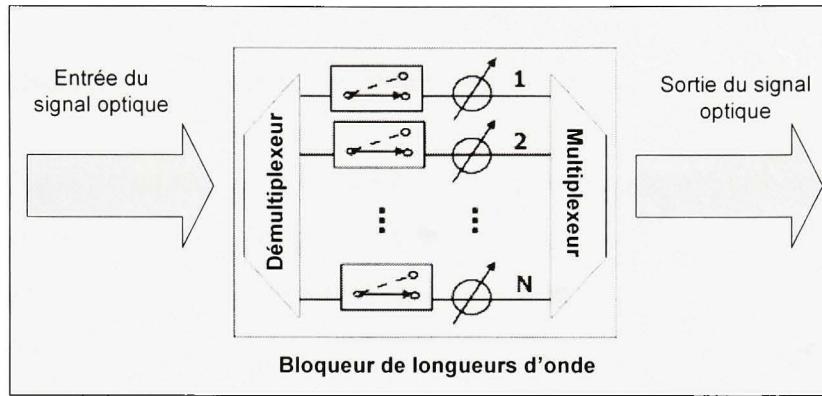
Par exemple, l'étude de la congestion des liens pendant l'étape de routage pourrait permettre de diminuer le nombre total de longueurs d'onde du réseau en favorisant une distribution des chemins optiques sur l'ensemble des liens. Cette méthode fait référence aux « chemins optiques pénalisés » des réseaux optiques traditionnels (Boujelben, Belhoste et Pierre, 2005). Son objectif est de trouver le meilleur compromis entre le chemin le plus court et la distribution uniforme des demandes. Par contre, comme l'étape de création de l'architecture des réseaux optiques sans filtre tient compte de plusieurs facteurs et est déjà soumise à plusieurs contraintes, ajouter l'étude de la congestion compliquerait sensiblement l'algorithme. De plus, une architecture qui diminue la congestion pour un trafic donné ne donne pas nécessairement d'aussi bons résultats lors d'une modification du trafic. Pour ces raisons, la diminution du nombre de longueurs d'onde est étudiée seulement après l'étape de conception de l'architecture et nécessite l'ajout de bloqueurs de longueurs d'onde.

### **3.3.1 Bloqueurs de longueurs d'onde**

Les bloqueurs de longueurs d'onde permettent de diminuer la congestion des réseaux optiques sans filtre en stoppant la propagation de certaines longueurs d'onde indésirables. Ainsi, les longueurs d'onde des demandes déjà satisfaites en amont sur un arbre de fibres sont bloquées, puis réassignées ensuite à d'autres demandes en aval. Les bloqueurs peuvent atténuer partiellement ou complètement une ou plusieurs longueurs d'onde selon les choix de l'utilisateur.

Dans sa plus simple expression, le bloqueur de longueurs d'onde est constitué d'un démultiplexeur, qui sépare chacune des longueurs d'onde, d'un nombre d'atténuateurs variables égal au nombre de longueurs d'onde, et d'un multiplexeur pour recombiner les longueurs d'onde (figure 3.9). D'autres bloqueurs utilisant des technologies plus complexes

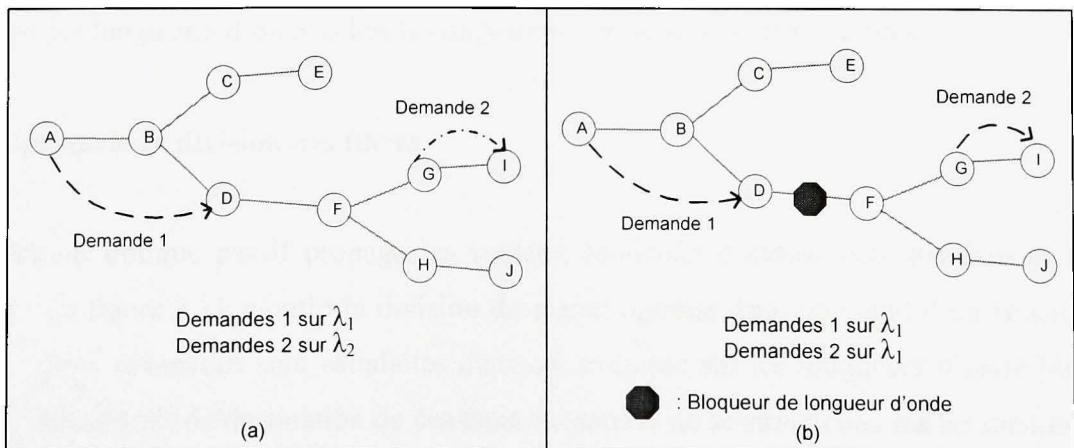
à base de microsystèmes électromécaniques (MEMS) ou d'écrans à cristaux liquides sont aussi disponibles sur le marché (Eldada, 2005).



**Figure 3.9 Bloqueur de longueurs d'onde simple.**

(Modifié de Eldada (2005, p. 6))

La figure 3.10 illustre un exemple de l'impact qu'a un bloqueur de longueurs d'onde sur les réseaux optiques sans filtre. À la figure 3.10 (a), la demande 1 se terminant au contact D se propage sur l'arbre de fibres jusqu'au contact I, empêchant la demande 2 d'utiliser la même longueur d'onde. Par contre, à la figure 3.10 (b), le bloqueur de longueurs d'onde placé entre les contacts D et F stoppe la propagation de la longueur d'onde  $\lambda_1$  sur le reste de l'arbre de fibres, ce qui permet de l'utiliser à nouveau pour la demande 2.



**Figure 3.10 Insertion d'un bloqueur de longueurs d'onde dans un arbre de fibres.**

Le nombre de longueurs d'onde employées pour une solution sans filtre est donc grandement influencé par l'emplacement des bloqueurs. Les sections suivantes expliquent les différentes méthodes pour trouver la position optimale des bloqueurs.

### 3.3.2 Approches intuitives de placement des bloqueurs

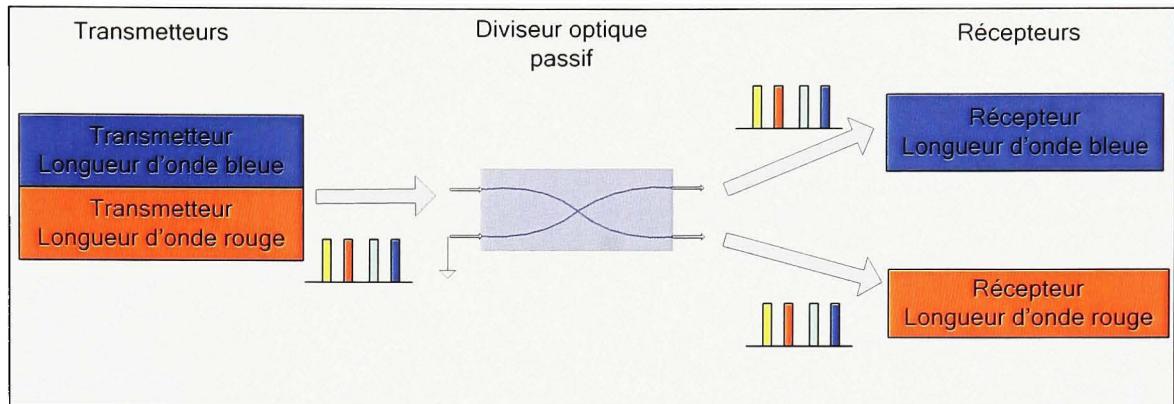
L'emplacement d'un bloqueur de longueurs d'onde peut être déterminé par une approche intuitive c'est-à-dire que, selon les caractéristiques des arbres de fibres, il est possible de déterminer approximativement la position d'un bloqueur de longueurs d'onde qui fera en sorte de diminuer sensiblement le nombre de longueurs d'onde du réseau. Cependant, l'emplacement du bloqueur ne sera pas nécessairement optimal (un emplacement optimal du bloqueur permet d'obtenir une assignation avec le moins de longueurs d'onde possible). En effet, pour les arbres de fibres complexes, comprenant plusieurs diviseurs optiques passifs qui combinent et divisent le signal optique, il est difficile de déterminer intuitivement l'emplacement optimal d'un bloqueur de longueurs d'onde. Pour cette raison, d'autres approches faisant intervenir des méthodes de calcul avancées sont proposées à la section suivante.

Différentes techniques intuitives de placement de bloqueurs peuvent être utilisées. Trois de ces techniques sont évaluées dans ce mémoire : bloquer les longueurs d'onde après la division des fibres, bloquer les longueurs d'onde au centre de l'arbre de fibres et finalement bloquer les longueurs d'onde selon la congestion des liens de l'arbre de fibres.

#### **Bloquer après la division des fibres**

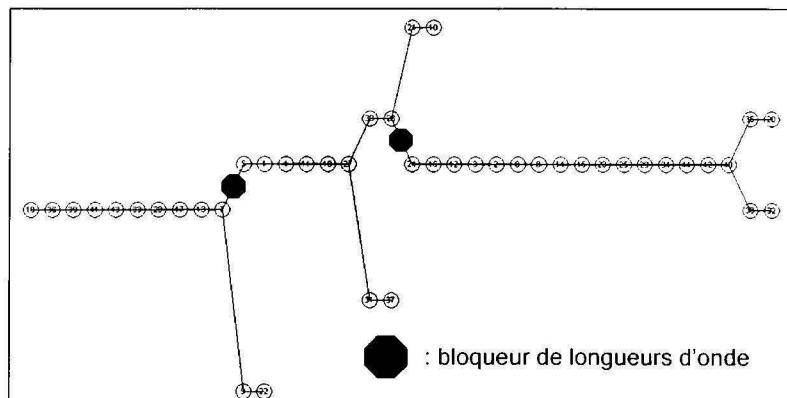
Le diviseur optique passif propage les signaux lumineux d'entrée vers ses deux ports de sortie. La figure 3.11 montre la division du signal optique dans un nœud d'un réseau sans filtre. Deux demandes sont satisfaites dans cet exemple sur les longueurs d'onde bleue et rouge. Les nœuds de destination de ces deux demandes ne se situent pas sur les mêmes liens de l'arbre de fibres. Pourtant, les longueurs d'onde sont envoyées dans les deux directions.

Par conséquent, la longueur d'onde bleue se retrouvant sur les liens de destination de la longueur d'onde rouge encombre inutilement ces liens et vice versa.



**Figure 3.11 Comportement spectral d'un diviseur optique passif.**

Pour restreindre le nombre de longueurs d'onde inutiles, une technique efficace est donc d'insérer les bloqueurs de longueurs d'onde après les diviseurs optiques passifs (figure 3.12).

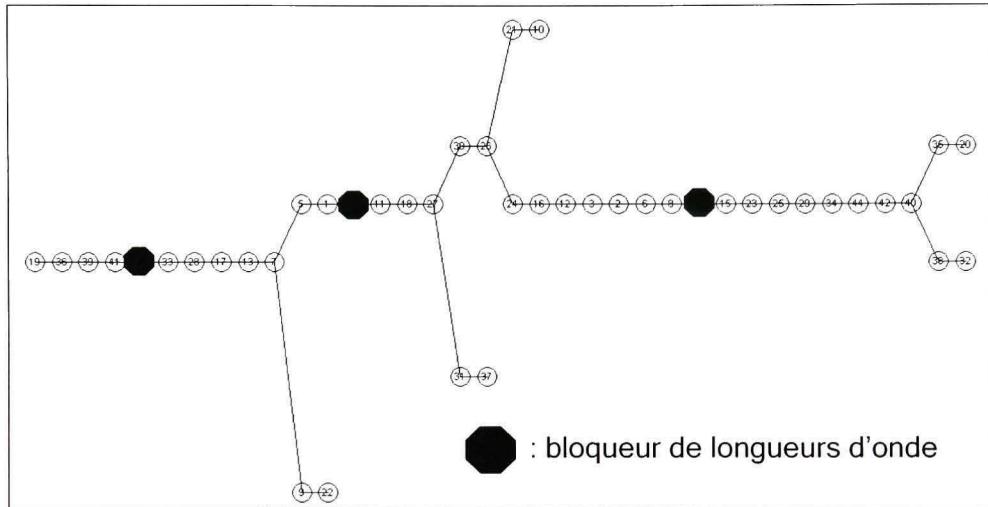


**Figure 3.12 Ajout de bloqueurs de longueurs d'onde après les diviseurs optiques passifs.**

### Bloquer au centre de l'arbre de fibres

L'insertion du bloqueur de longueurs d'onde au milieu de l'arbre de fibres (selon la longueur physique des liens ou le nombre de nœuds) est une autre méthode intuitive de placement. Lorsque plusieurs bloqueurs doivent être insérés sur le réseau, cette technique est alors

modifiée en plaçant les bloqueurs au centre de chacune des sections principales de l'arbre de fibres (figure 3.13).



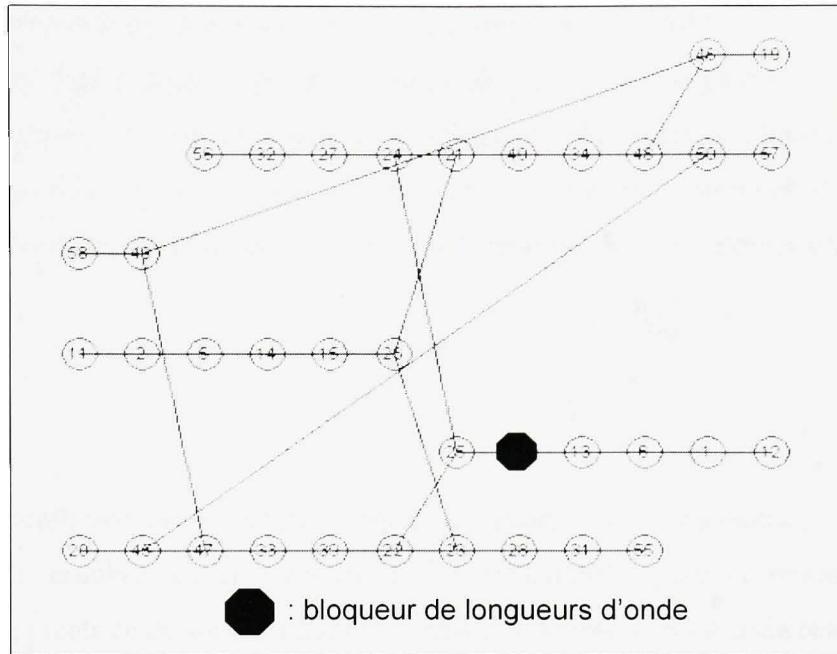
**Figure 3.13 Ajout de bloqueur de longueurs d'onde au centre des sections.**

Ces deux premières méthodes, sans être nécessairement optimales, ont l'avantage de ne pas être dépendantes du trafic du réseau. En effet, un bloqueur situé à un emplacement optimal selon un trafic donné peut avoir beaucoup moins d'impact lorsque le trafic est modifié.

### Bloquer selon la congestion des liens

La dernière approche intuitive pour déterminer l'emplacement des bloqueurs de longueurs d'onde consiste à trouver la branche optique où la congestion des liens est la plus élevée et d'y insérer un bloqueur.

Par exemple, dans le cas où les liens les plus congestionnés de l'arbre de fibres de la figure 3.14 sont les liens [13,6], [6,1] et [1,12], un bloqueur de longueurs d'onde inséré en amont de ces liens permettra de diminuer la congestion dans le réseau. Cette méthode est par contre dépendante de la matrice de trafic et non de l'architecture des arbres de fibres. Elle n'est donc pas nécessairement efficace lorsqu'il y a une modification du trafic.



**Figure 3.14 Ajout de bloqueur de longueurs d'onde selon la congestion.**

Pour obtenir de meilleurs résultats dans le placement de bloqueurs, la méthode proposée dans ce mémoire intègre l'assignation de longueurs d'onde et le placement de bloqueurs dans une même optimisation. Cette optimisation peut être réalisée à l'aide de programmation linéaire (section suivante) ou d'une météuristiche (section 3.3.4).

### 3.3.3 Résolution par programmation linéaire

Les méthodes de placement des bloqueurs décrites dans cette section et la section suivante (3.3.4) évaluent le nombre de longueurs d'onde utilisées sur le réseau selon l'emplacement des bloqueurs. L'objectif est de trouver le positionnement des bloqueurs qui minimise le nombre de longueurs d'onde du réseau pour les divers emplacements potentiels des bloqueurs (chaque lien est considéré comme un emplacement potentiel pour un bloqueur). La solution obtenue contient à la fois l'assignation de longueurs d'onde et l'emplacement optimal des bloqueurs.

La méthode par programmation linéaire réalise une assignation de longueurs d'onde pour tous les emplacements potentiels du réseau. La formulation du problème est similaire à celle du coloriage de graphes mais contient des ajouts pour incorporer le placement des bloqueurs. La section suivante contient les détails du problème de placement des bloqueurs résolu par programmation linéaire. Des travaux antérieurs traitant du coloriage de graphes par programmation linéaire sont disponibles dans la littérature (Marino, Prugel-Bennett et Glass, 1999).

## Variables

Les variables utilisées lors de la programmation linéaire sont les suivantes :

- $n$  : nombre de demandes (nombre maximal de longueurs d'onde),
- $x_{ij}$  : matrice de solution pour l'assignation de longueurs d'onde (assignation de la demande  $i$  à la couleur  $j$  si  $x_{ij} = 1$ ),
- $w_k$  : vecteur de solution pour le placement des bloqueurs (si  $w_k = 1$ , un bloqueur est placé avant le contact  $k$ ),
- $c_{ij}$  : matrice de coût pour assigner la demande  $i$  à la longueur d'onde  $j$ ,
- $p$  : nombre de bloqueurs de longueurs d'onde potentiels (égal au nombre de liens du réseau),
- NbWB : nombre de bloqueurs de longueurs d'onde pouvant être utilisés (spécifié par l'utilisateur).

## Fonction objective

La fonction objective  $F$  (3.1) qui doit être minimisée se divise en deux parties séparées par une soustraction. La partie de gauche de la fonction objective est en tout point similaire au problème de coloriage de graphe par programmation linéaire. L'ajout de la sommation comprenant le vecteur  $w_k$  permet de déterminer le meilleur emplacement des bloqueurs de longueurs d'onde.

$$\text{Minimiser } F = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} - \sum_{k=1}^p w_k \quad (3.1)$$

Pour minimiser le nombre de longueurs d'onde, le coefficient de coûts (c) est incrémenté de un pour chacune des longueurs d'onde utilisées. Donc, pour que la fonction objective soit la plus basse possible, le nombre de longueurs d'onde doit être minimum ce qui est similaire au problème de coloriage de graphe ordinaire. En ce qui concerne l'ajout des bloqueurs, comme la sommation contenant le vecteur  $w$  est soustraite, plus il y a de bloqueurs en fonction et plus la fonction objective est minimale. C'est logique puisque plus il y a de bloqueurs sur la ligne, moins il y a de longueurs d'onde utilisées.

### Contraintes d'égalité

Pour résoudre un problème en programmation linéaire, il faut énoncer des contraintes qui limiteront les valeurs possibles des variables contenues dans la fonction objective. Il peut y avoir des contraintes d'égalité et d'inégalité. Voici les contraintes d'égalité pour le problème d'assignation de longueurs d'onde et de placement des bloqueurs :

1<sup>ière</sup> Contrainte : Une seule longueur d'onde pour chacune des demandes (même contrainte que pour le problème de coloriage de graphe).

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 1 \quad (i = 1, 2 \dots n) \quad (3.2)$$

2<sup>ière</sup> Contrainte : La somme des bloqueurs doit être égale à une valeur prédéterminée, spécifiée par l'utilisateur (NbWB).

$$\sum_{k=1}^p w_k = \text{NbWB}$$

(3.3)

## Contrainte d'inégalité

Contrainte : Les demandes en conflit ne peuvent être placées sur la même longueur d'onde sauf si un bloqueur de longueurs d'onde annule ce conflit.

$$x_{c_m j} + x_{d_m j} + \sum_{k=1}^p w_k v_{mk} \leq \text{NbWB} + 1 \quad (j=1,2,\dots,n) \quad \forall m \quad (3.4)$$

$c_{mj}$  : Première demande pour le conflit  $m$ .

$d_{mj}$  : Deuxième demande pour le conflit  $m$ .

$v_{mk}$  : Vecteur qui indique si le bloqueur  $k$  annule le conflit  $m$ . La valeur 0 est donnée lorsque le bloqueur annule le conflit  $m$  (1 si ce n'est pas le cas).

Pour pouvoir vérifier cette contrainte, il faut d'abord connaître les conflits entre les demandes (comme pour la contrainte d'égalité dans un coloriage de graphe ordinaire). Ensuite, il faut déterminer si l'insertion d'un bloqueur permet de stopper une des deux longueurs d'onde pour annuler ce conflit. Cette évaluation doit être effectuée pour tous les emplacements potentiels de bloqueurs et pour tous les conflits entre les demandes sur chacune des longueurs d'onde. Ainsi, la solution obtenue comprend la position optimale des bloqueurs de longueurs et l'assignation qui minimise le nombre total de longueurs d'onde sur le réseau. Le tableau 3.1 résume les types de conflits possibles et les valeurs que prennent les variables dans l'inéquation 3.4. Finalement, il indique si la contrainte d'inégalité est satisfaite pour chacun des types de conflits.

**Tableau 3.1**  
**Détail de l'équation 3.4 selon les différents types de conflit**

<b>Types de conflits</b>	<b><math>xc_{mj}</math></b>	<b><math>xd_{mj}</math></b>	$\sum_{k=1}^p w_k v_{mk}$	<b>NbWB</b>	<b>Contrainte</b>
Conflit entre les demandes c et d (pas de bloqueur).	1	1	0	0	Non Satisfait
Conflit entre les demandes c et d (un bloqueur présent mais qui n'annule pas le conflit).	1	1	1	1	Non Satisfait
Conflit entre les demandes c et d (deux bloqueurs présents mais qui n'annulent pas le conflit).	1	1	2	2	Non Satisfait
Conflit entre les demandes c et d (un bloqueur présent qui annule le conflit).	1	1	0	1	Satisfait
Conflit entre les demandes c et d (deux bloqueurs présents qui annulent le conflit).	1	1	0	2	Satisfait
Conflit entre les demandes c et d (deux bloqueurs présents, un seul qui annule le conflit).	1	1	1	2	Satisfait

### Résultats de la programmation linéaire

La programmation linéaire a été utilisée pour résoudre le problème de placement des bloqueurs de longueurs d'onde sur des réseaux de quelques nœuds (environ quatre) avec une dizaine de demandes. De cette manière, ces résultats ont pu être comparés avec une étude exhaustive du problème qui évaluait l'assignation de longueurs d'onde pour tous les emplacements possibles de bloqueurs de longueurs d'onde (par la recherche Tabou). Les résultats concordent entre ces deux méthodes. En effet, la résolution du problème par

programmation linéaire permet de trouver l'emplacement qui diminue le plus le nombre de longueurs d'onde pour une solution sans filtre donnée.

Par contre, comme les matrices utilisées doivent contenir les conflits entre toutes les demandes et ce, sur toutes les longueurs d'ondes possibles, la résolution du problème prend beaucoup de temps et nécessite beaucoup de ressources dans le cas de réseaux à plusieurs nœuds où il y a plusieurs demandes à satisfaire (un réseau à 17 nœuds et 272 demandes prend des jours de temps de calcul). Pour ces raisons, une approche métaheuristique est proposée à la section suivante. La méthode de placement des bloqueurs de longueurs d'onde par programmation linéaire n'est pas pour autant laissée de côté mais certaines modifications doivent y être apportées pour réduire les temps de calcul.

### 3.3.4 Résolution par une métaheuristique

L'approche métaheuristique utilise les algorithmes génétiques pour résoudre le problème de placement des bloqueurs de longueurs d'onde. La structure de ces algorithmes se base sur celle créée par Benoît Châtelain, membre de l'équipe de recherche sur les réseaux optiques sans filtre, et permet de concevoir l'architecture des réseaux optiques sans filtre. Elle a par contre été modifiée pour correspondre au problème du placement des bloqueurs.

Les algorithmes génétiques fonctionnent généralement de cette manière : création d'une population, sélection selon une fonction d'évaluation, recombinaison et mutation de la population et ainsi de suite (Mitchell, 1998). En effet, un ensemble de solutions est d'abord créé, ensuite ces solutions sont modifiées selon des techniques faisant référence à la génétique des populations, puis les solutions modifiées sont évaluées et retenues lorsqu'elles sont meilleures que les solutions d'origine (selon la fonction d'évaluation). Ce processus est répété un grand nombre de fois pour que la solution finale se rapproche le plus de la solution optimale.

Dans le cas du placement de bloqueurs, l'objectif de cette optimisation est d'assigner les demandes sur le moins de longueurs d'onde possible en trouvant l'emplacement optimal des bloqueurs de longueurs d'onde. La population, dans ce cas-ci, représente les solutions d'assignation de longueurs d'onde (longueurs d'onde pour chacune des demandes). De plus, chacune des solutions se voit attribuer des bloqueurs de longueurs d'onde dans la banque de bloqueurs potentiels. Le principe est de réassigner certaines longueurs d'onde de façon à réduire leur nombre et ce, sans créer de nouveaux conflits. Comme les bloqueurs de longueurs d'onde permettent d'annuler des conflits, les solutions ayant des bloqueurs placés aux endroits optimaux utiliseront moins de longueurs d'onde.

Les résultats de l'assignation de longueurs d'onde sans bloqueur représentent la population de départ; il n'y a donc pas de conflit de longueurs d'onde entre les demandes au début de l'optimisation. Ensuite, une longueur d'onde est choisie au hasard pour être supprimée. Les demandes utilisant cette longueur d'onde se voient alors assigner une autre longueur d'onde. Cette dernière action est réalisée par la mutation et/ou la recombinaison de la moitié de la population. Ensuite, chacune des solutions est évaluée. Cette évaluation tient compte des bloqueurs attribués aux solutions pour déterminer si un nouveau conflit est créé lors de la modification de la population. Si la nouvelle assignation de longueurs d'onde provoque l'apparition d'un conflit, cette solution est rejetée. Par contre, dans le cas où aucun conflit n'apparaît, la solution est conservée et le nombre de longueurs d'onde assigné est diminué de un. L'emplacement des bloqueurs de longueurs d'onde pour une solution est lui aussi soumis à une mutation pour ne pas confiner l'optimisation dans l'évaluation d'un seul emplacement de bloqueur.

Le résultat final comprend donc la nouvelle assignation de longueurs d'onde ainsi que l'emplacement optimal des bloqueurs. La plateforme de conception et de simulation permet ensuite de vérifier ces résultats en effectuant une simple assignation de longueurs d'onde où l'emplacement optimal des bloqueurs est spécifié comme donnée de départ.

### 3.3.5 Analyse comparative des méthodes de placement des bloqueurs

Une étude a été réalisée pour comparer les différentes méthodes de placement des bloqueurs. Quatre solutions sans filtre de trois réseaux différents ont été évaluées (voir chapitre 4 pour la description de ces réseaux). Pour chacune des solutions, un certain nombre de bloqueurs de longueurs d'onde sont placés sur le réseau selon les méthodes décrites précédemment. Le tableau 3.2 contient le nombre de longueurs d'onde utilisées pour chaque solution sans filtre selon le nombre de bloqueurs employés et la méthode de placement choisie.

Cette étude montre que le placement de bloqueurs par l'approche métaheuristique obtient des résultats globaux supérieurs à ceux des méthodes intuitives. Par contre, dans certains cas les méthodes intuitives et métaheuristique obtiennent des résultats équivalents, notamment pour le réseau allemand à 7 nœuds (il est à noter que la solution intuitive consistant à bloquer après la division des fibres ne s'applique pas à cette solution car les arbres de fibres ne contiennent pas de diviseurs optiques passifs). Par contre, pour la deuxième solution, la méthode métaheuristique place les bloqueurs de manière à utiliser beaucoup moins longueurs d'onde.

Les résultats de l'étude, présentés au tableau 3.2, permettent aussi d'émettre certaines constatations. Entre autres, que l'effet des bloqueurs sur la réduction du nombre de longueurs d'onde dépend grandement de l'architecture de la solution sans filtre. La solution sans filtre 2, qui est composée d'un seul arbre de fibres, voit son nombre de longueurs d'onde diminuer de 55 pourcent avec l'ajout de quatre bloqueurs tandis que la solution 3 ne permet qu'une diminution de longueurs d'onde de huit pourcent avec le même nombre de bloqueurs. Les figures 3.15 (a) et 3.15 (b) montrent respectivement l'arbre principal de la solution sans filtre 2 (réseau allemand à sept nœuds) et l'arbre de fibres de la solution sans filtre 3 (réseau allemand à 17 nœuds). L'arbre de fibres de la solution 3 contient beaucoup plus de contacts, de diviseurs optiques passifs et de branches optiques que celui de la solution 2. Selon les résultats du tableau 3.2, les bloqueurs semblent donc avoir moins d'impact sur le nombre de longueurs d'onde lorsque les arbres de fibres sont complexes.

La méthode intuitive qui donne les meilleurs résultats est celle qui place les bloqueurs de longueurs d'onde au centre des arbres de fibre (ou au centre des branches lorsqu'il y a plus d'un bloqueur utilisé).

**Tableau 3.2**  
**Résultats de l'assignation de longueurs d'onde**  
**selon les méthodes de placement des bloqueurs**

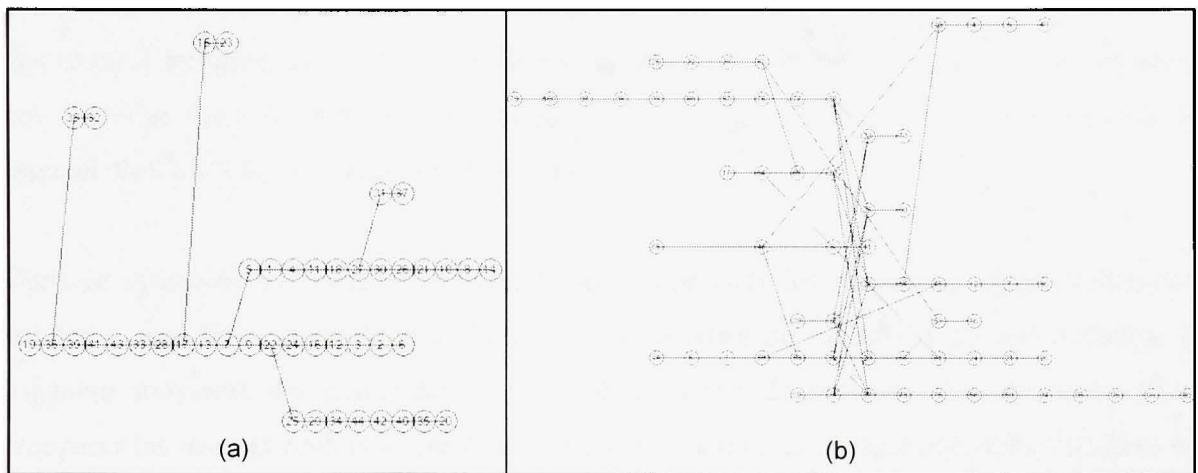
Solutions sans filtre	Sans Bloqueur	Nombre de bloqueurs	Solutions Intuitives			Solutions Heuristiques
			BAD*	BM**	BCL***	
1) Réseau allemand à sept nœuds	35	1	-	33	33	33
		2	-	22	22	22
		3	-	22	22	22
		4	-	22	22	22
2) Réseau allemand à sept nœuds	85	1	82	56	82	56
		2	50	53	80	50
		3	50	51	71	44
		4	50	51	68	38
3) Réseau allemand à 17 nœuds	90	1	90	87	90	90
		2	88	84	87	86
		3	88	84	85	85
		4	88	84	85	83
4) Réseau californien	120	1	120	120	120	114
		2	118	115	117	112
		3	118	108	110	111
		4	118	105	110	102

\* BAD : Bloquer après la division des fibres

\*\* BM : Bloquer au milieu de l'arbre de fibres ou des branches

\*\*\* BCL : Bloquer selon la congestion des liens

Cette analyse comparative primaire permet de valider la méthode de placement des longueurs d'onde par métaheuristique et d'émettre certaines observations sommaires sur le placement des bloqueurs. Pour formuler des conclusions plus générales sur le sujet, une étude concernant le placement de bloqueurs de longueurs d'onde pour plusieurs solutions sans filtre ayant différents schèmes de trafic par solution doit maintenant être réalisée.



**Figure 3.15 Arbres de fibres des solutions sans filtre 2 et 3.**

## CHAPITRE 4

### RÉSULTATS ET ANALYSES

#### 4.1 Présentation des résultats de conception et de simulation

Cette section contient les résultats générés par la plateforme de conception et de simulation des réseaux optiques sans filtre pour divers réseaux de référence. Dans le but de comparer ces solutions avec des solutions traditionnelles, ces réseaux ont aussi été simulés avec le logiciel *NetCalc Optical PlannerI™* (version 3.1).

Dans ce mémoire, les paramètres permettant de comparer les solutions traditionnelles aux solutions sans filtre sont : le coût du réseau, le nombre de longueurs d'onde utilisées, la longueur moyenne des demandes et le nombre moyen de segments par demande. Pour comparer les réseaux optiques sans filtre entre eux, ces mêmes paramètres sont considérés en plus de ceux qui sont propres à la technologie sans filtre, comme par exemple la longueur maximale des arbres de fibre, le nombre d'arbres de fibre, la longueur maximale de combinaison du signal ou le nombre de diviseurs optiques passifs.

Comme les solutions sans filtre proposées n'offrent pas une protection de toutes les demandes, les réseaux traditionnels de comparaison ne considèrent pas non plus la protection du signal. Néanmoins, le pourcentage de demandes protégées pour les réseaux optiques sans filtre est inclus dans les résultats car il est un indicateur du nombre de connexions totales entre les nœuds et qu'il permet d'associer un coût relatif à une protection totale des demandes.

#### Solutions proposées

Pour chacun des réseaux étudiés, plusieurs solutions sans filtre ont été générées et analysées par la plateforme. Six solutions par réseau sont ensuite proposées. Ces solutions sont choisies car elles obtiennent des résultats optimaux (ou quasi optimaux) pour six paramètres

prédéfinis. Le tableau 4.1 présente ces paramètres en plus d'expliquer les différents objectifs d'optimisation.

**Tableau 4.1**  
**Critères de sélection des solutions sans filtre**

	<b>Paramètres d'optimisation</b>	<b>Objectifs d'optimisation</b>
A	<b>Nombre de longueurs d'onde</b>	Paramètre à minimiser pour maximiser la capacité du réseau.
B	<b>Distance maximale de combinaison</b>	Paramètre à minimiser pour limiter la dégradation en OSNR sur la ligne (dû à la combinaison de longues branches optiques).
C	<b>Nombre de diviseurs optiques passifs</b>	Paramètre à minimiser pour diminuer les coûts et augmenter le budget de puissance.
D	<b>Nombre moyen de segments par demande</b>	Paramètre à minimiser pour diminuer les coûts.
E	<b>Pourcentage de protection</b>	Paramètre à maximiser pour diminuer les coûts d'une protection totale.
F	<b>Longueur d'arbres de fibres</b>	Paramètre à minimiser pour diminuer les coûts du réseau et augmenter le budget de puissance.

Il faut noter que la solution proposée pour chacun des paramètres d'optimisation ne représente pas nécessairement celle ayant obtenue le résultat optimal pour ce paramètre mais parfois une solution quasi optimale plus équilibrée. Par exemple, si la solution optimale quant au nombre de longueurs d'onde emploie deux fois plus de diviseurs optiques passifs qu'une autre solution utilisant une longueur d'onde de plus, c'est plutôt cette dernière

solution qui est proposée. Pour ce faire, la première étape consiste à sélectionner un certain nombre de solutions ayant obtenues les meilleurs résultats pour le paramètre d'optimisation (environ dix pourcent du nombre total de solutions). Ensuite, parmi ces solutions, celle qui présente les caractéristiques globales les plus équilibrées est proposée. Il y a donc six solutions proposées par réseau, ou moins lorsqu'une solution est optimale pour plus d'un paramètre.

À cause de contraintes physiques relatives au bruit et à l'atténuation du signal sur la ligne de transmission, les arbres de fibres des solutions proposées doivent être limités à une longueur de 1500 km. De plus, comme ces solutions doivent supporter une quantité de trafic égale ou supérieure à celles des réseaux traditionnels, les solutions ayant un nombre de longueurs d'onde supérieur de 25 pourcent à la moyenne des longueurs d'onde utilisées dans les solutions traditionnelles ne sont pas davantage considérées. Par contre, lorsque l'ensemble des solutions sans filtre générées a un nombre de longueurs d'onde supérieur à cette valeur limite, les solutions avec le moins de longueurs d'onde sont alors privilégiées.

La section suivante présente les caractéristiques des réseaux étudiés et leur topologie, les propriétés des solutions traditionnelles, celles des solutions sans filtre proposées, ainsi que la représentation graphique d'un exemple de solution sans filtre et d'un des arbres de fibre la constituant. Les réseaux étudiés sont présentés dans un ordre croissant selon leur diamètre (le plus long des « plus courts chemins » entre deux nœuds). L'annexe III contient l'ensemble des représentations graphiques des solutions sans filtre proposées.

#### 4.1.1 Réseau allemand à 7 nœuds

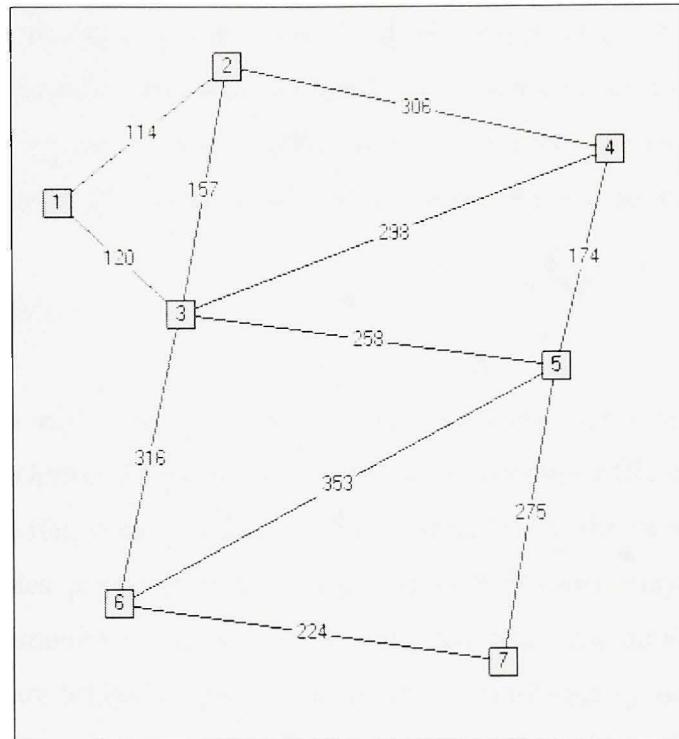


Figure 4.1 *Topologie du réseau allemand à sept nœuds (Betker et al., 2004).*

Tableau 4.2

Principales caractéristiques du réseau allemand à sept nœuds

<b>Nombre de nœuds</b>	7
<b>Nombre de liens</b>	11
<b>Degré minimum des nœuds</b>	2
<b>Degré maximum des nœuds</b>	5
<b>Degré moyen des nœuds</b>	3.1
<b>Longueur totale de fibre (km)</b>	2595
<b>Longueur minimale des liens (km)</b>	114
<b>Longueur maximale des liens (km)</b>	353
<b>Longueur moyenne des liens (km)</b>	235
<b>Diamètre du réseau (km)</b>	690
<b>Nombre de demandes (10 Gigabits)</b>	148

En raison de sa petite taille, le réseau allemand à sept nœuds permet d'évaluer facilement les concepts de base des réseaux optiques sans filtre (figure 4.1). Ce réseau est composé d'une partie des nœuds du réseau panallemand à 17 nœuds (Betker *et al.*, 2004). Les principales caractéristiques du réseau se retrouvent au tableau 4.2. Pour ce réseau seulement, la matrice de trafic utilisée ne correspond pas à l'établissement d'une connexion entre tous les nœuds du réseau mais bien à une matrice spécifique pour ces réseaux fournie par Betker *et al.* (2004).

### Solutions traditionnelles

Le tableau 4.3 contient les propriétés des deux solutions générées par le logiciel de simulation *NetCalc Optical Planner 3.1™*. Les deux solutions diffèrent par leur paramètre d'optimisation. En effet, il est possible de choisir entre le coût du réseau (correspondant au routage des demandes par le plus court chemin) et le nombre moyen de segments par demande comme paramètre à minimiser lors du routage. La moyenne du nombre de longueurs d'onde entre les deux solutions est de 35. Cela indique qu'une solution sans filtre à ce réseau doit utiliser moins de 43 longueurs d'onde pour être retenue.

**Tableau 4.3**

**Sommaire des solutions traditionnelles pour le réseau allemand à 7 nœuds**

<b>Objectif de routage (paramètre à minimiser)</b>	<b>Nombre de segments par demande</b>	<b>Coût</b>
<b>Longueur moyenne des demandes (km)</b>	355	349
<b>Longueur maximale d'une demande (km)</b>	755	690
<b>Nombre moyen de segments par demande</b>	1.44	1.51
<b>Nombre de demandes ayant plus de 2 segments</b>	6	10
<b>Nombre de longueurs d'onde</b>	40	30

## Solutions sans filtre proposées

**Tableau 4.4**  
**Solutions sans filtre proposées pour le réseau allemand à 7 nœuds**

<b>Solutions</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>
<b>Paramètres d'optimisation (tableau 4.1)</b>	<b>A</b>	<b>B et C</b>	<b>D</b>	<b>E</b>	<b>F</b>
<b>Longueur du plus long arbre de fibres (km)</b>	1137	1057	838	1214	838
<b>Nombre d'arbres de fibres</b>	5	5	4	3	7
<b>Nombre de diviseurs optiques passifs</b>	6	6	22	16	16
<b>Nombre de branches optiques</b>	10	10	20	14	18
<b>Distance maximale de combinaison (km)</b>	604	533	540	533	540
<b>Degré de combinaison maximum</b>	2	2	3	3	3
<b>Longueur moyenne des demandes (km)</b>	390	378	350	374	376
<b>Longueur maximale d'une demande (km)</b>	862	1057	697	831	838
<b>Nombre moyen de segments par demande</b>	1,56	1,53	1,44	1,57	1,49
<b>Nombre de demandes ayant plus de 2 segments</b>	24	16	6	22	14
<b>Nombre de longueurs d'onde</b>	28	35	34	37	37
<b>Pourcentage de protection</b>	33	24	33	71	19

Chacune des colonnes du tableau 4.4 correspond à une solution sans filtre choisie selon un des paramètres d'optimisation du tableau 4.1. Dans ce cas-ci, la même solution sans filtre (2) minimise à la fois la distance maximale de combinaison et le nombre de diviseurs optiques passifs (solutions B et C). Cette solution est représentée graphiquement à la figure 4.2. Les

arbres de fibres y sont indiqués d'une couleur différente et la figure 4.3 montre la représentation par contacts d'un de ces arbres de fibres.

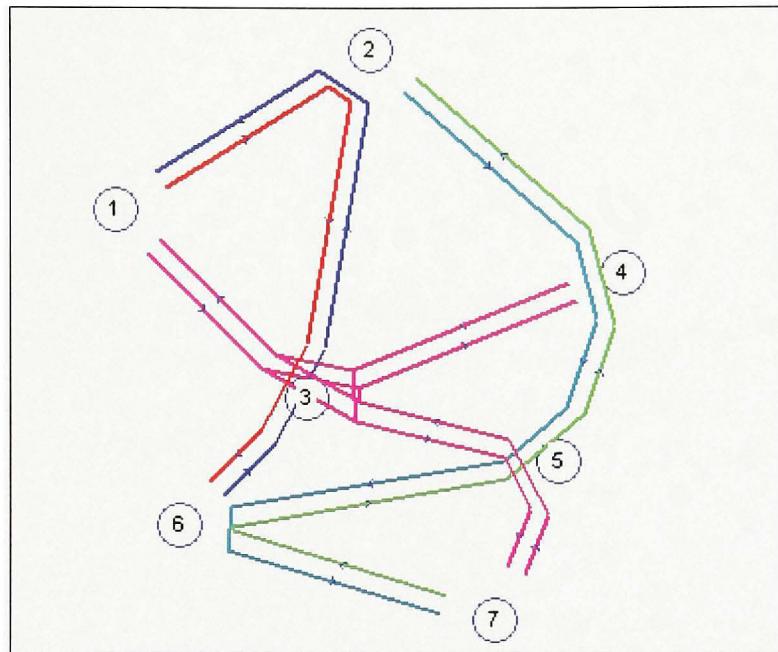


Figure 4.2 *Solution sans filtre 2 du réseau allemand à 7 nœuds.*

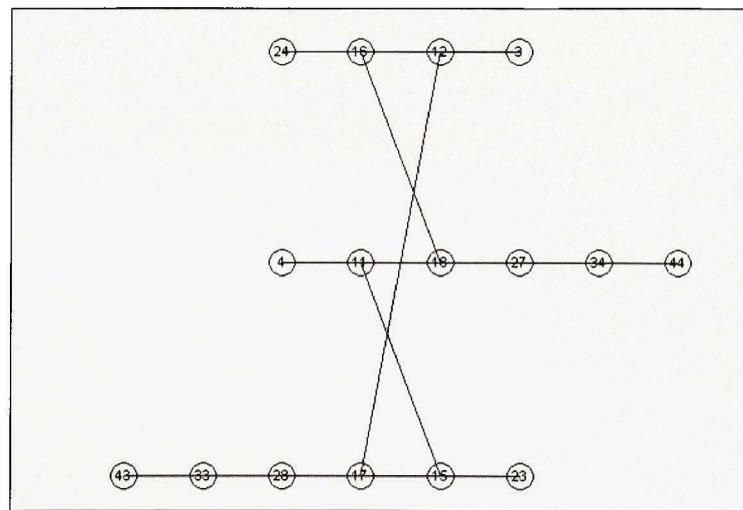


Figure 4.3 *Représentation par contacts d'un arbre de fibres de la solution 2.*

#### 4.1.2 Réseau italien

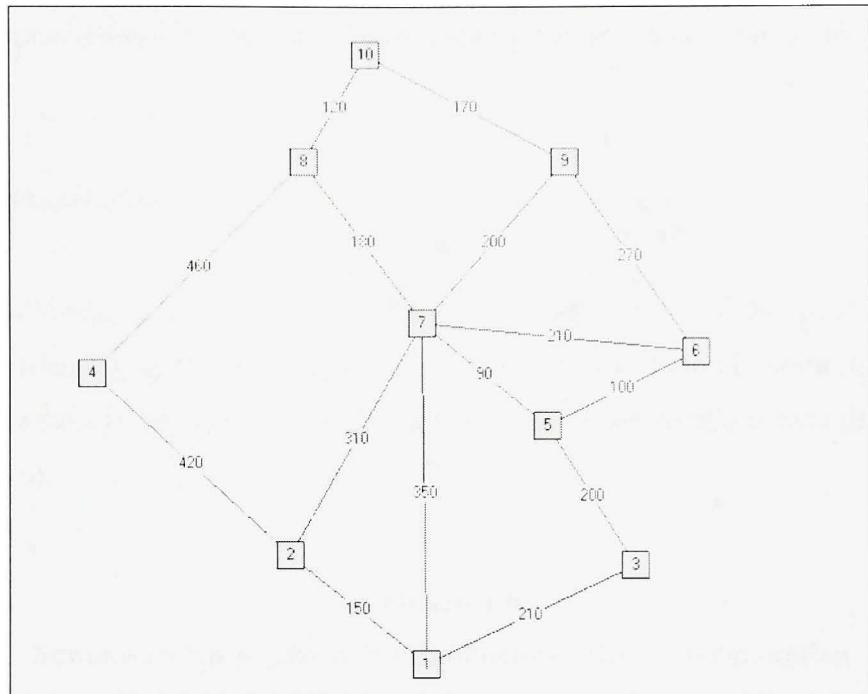


Figure 4.4 Topologie du réseau italien (Ali, 2005).

Tableau 4.5  
Principales caractéristiques du réseau italien

<b>Nombre de nœuds</b>	10
<b>Nombre de liens</b>	15
<b>Degré minimum des nœuds</b>	2
<b>Degré maximum des nœuds</b>	6
<b>Degré moyen des nœuds</b>	3
<b>Longueur totale de fibre (km)</b>	3440
<b>Longueur minimale des liens (km)</b>	90
<b>Longueur maximale des liens (km)</b>	460
<b>Longueur moyenne des liens (km)</b>	229
<b>Diamètre du réseau (km)</b>	830
<b>Nombre de demandes (10 Gigabits)</b>	90

La topologie du réseau italien à dix nœuds est exposée à la figure 4.4. Ce réseau constitue une partie du réseau national italien (Ali, 2005). La longueur moyenne des liens est similaire à celle du réseau précédent tandis que la longueur totale des fibres est plus élevée (tableau 4.5). Une caractéristique intéressante de ce réseau est la présence d'un nœud central (nœud 7).

### Solutions traditionnelles

À cause de la topologie du réseau, la congestion des liens est très faible pour la matrice de trafic définie (une connexion entre tous les nœuds du réseau). Selon le nombre de longueurs d'onde obtenu dans les cas traditionnels, la limite imposée aux solutions sans filtre est fixée à 31 (tableau 4.6).

**Tableau 4.6**  
**Sommaire des solutions traditionnelles pour le réseau italien**

<b>Réseaux sans protection</b>		
<b>Objectif de routage (paramètre à minimiser)</b>	Nombre de segments	Coût
<b>Longueur moyenne des demandes (km)</b>	422	407
<b>Longueur maximale d'une demande (km)</b>	1000	830
<b>Nombre moyen de segments par demande</b>	1.91	2.02
<b>Nombre de demandes ayant plus de 2 segments</b>	20	26
<b>Nombre de longueurs d'onde</b>	22	28

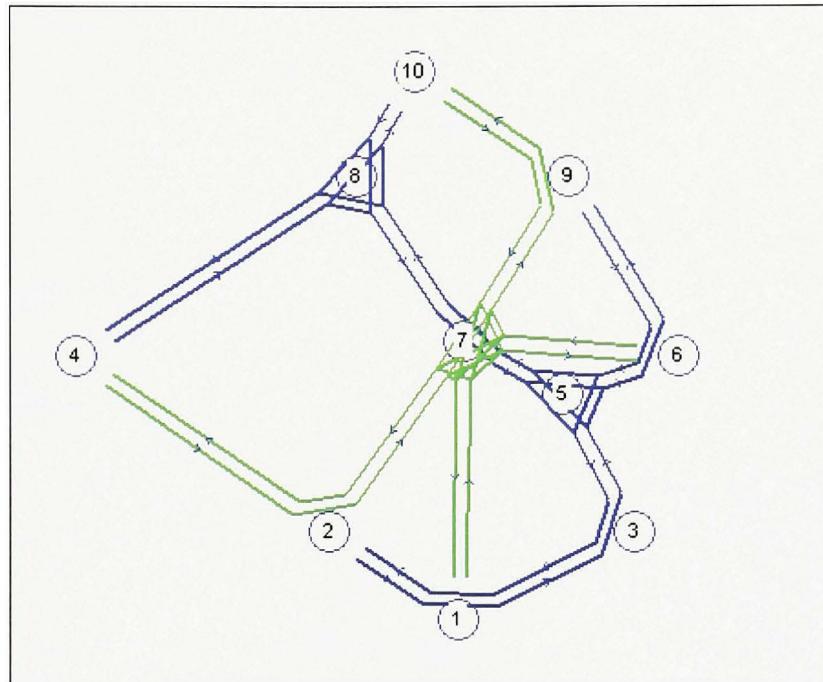
## Solutions sans filtre proposées

**Tableau 4.7**  
**Solutions sans filtre proposées pour le réseau italien**

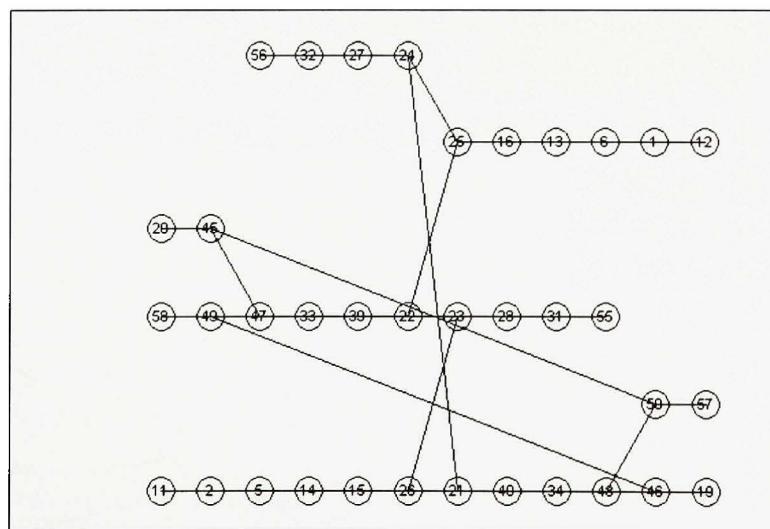
<b>Solutions</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
<b>Paramètres d'optimisation (Tableau 4.1)</b>	<b>A, D et E</b>	<b>B et F</b>	<b>C</b>
<b>Longueur du plus long arbre de fibres (km)</b>	1290	990	1230
<b>Nombre d'arbres de fibres</b>	2	5	2
<b>Nombre de diviseurs optiques passifs</b>	28	36	18
<b>Nombre de branches optiques</b>	24	34	18
<b>Distance maximale de combinaison (km)</b>	830	640	820
<b>Degré de combinaison maximum</b>	3	4	2
<b>Longueur moyenne des demandes (km)</b>	464	436	488
<b>Longueur maximale d'une demande (km)</b>	1080	850	1100
<b>Nombre moyen de segments par demande</b>	2,18	2,09	2,27
<b>Nombre de demandes ayant plus de 2 segments</b>	92	86	94
<b>Nombre de longueurs d'onde</b>	25	31	28
<b>Pourcentage de protection</b>	47	27	47

Pour ce réseau, il y a trois solutions sans filtre proposées. La première solution présente des résultats optimaux pour le nombre de longueurs d'onde, le nombre moyen de segments par demande et le pourcentage de protection; ses caractéristiques sont affichées dans la première colonne du tableau 4.7 et son architecture est représentée graphiquement aux figures 4.5 et 4.6. Quant à la deuxième solution, elle obtient les meilleurs résultats pour deux paramètres

d'optimisation, soient le nombre de diviseurs optiques passifs et la longueur des arbres de fibres.



**Figure 4.5 Solution sans filtre 1 du réseau italien.**



**Figure 4.6 Représentation par contacts d'un arbre de fibres de la solution 1.**

#### 4.1.3 Réseau allemand à 17 nœuds

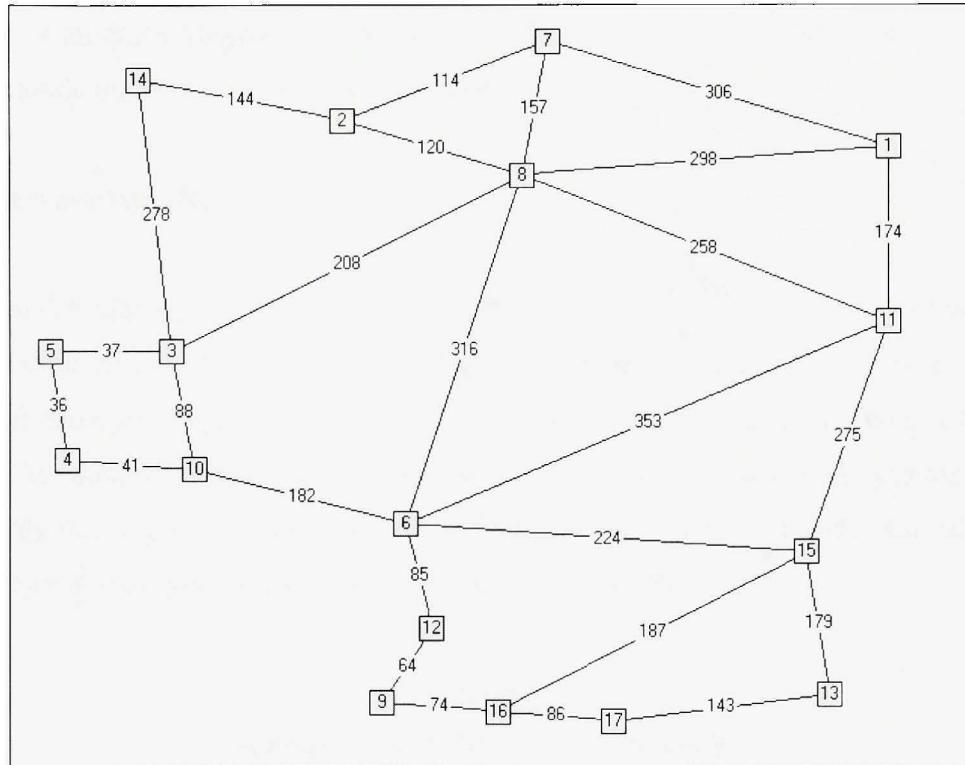


Figure 4.7 Topologie du réseau allemand à 17 nœuds (Betker et al., 2004).

Tableau 4.8  
Principales caractéristiques du réseau allemand à 17 nœuds

Nombre de nœuds	17
Nombre de liens	26
Degré minimum des nœuds	2
Degré maximum des nœuds	6
Degré moyen des nœuds	3.1
Longueur totale de fibre (km)	4427
Longueur minimale des liens (km)	36
Longueur maximale des liens (km)	353
Longueur moyenne des liens (km)	170
Diamètre du réseau (km)	951
Nombre de demandes (10 Gigabits)	272

Le réseau allemand à 17 nœuds couvre l'ensemble de l'Allemagne (figure 4.7). Les sept nœuds du premier réseau y sont inclus en plus de dix nœuds situés dans la partie sud et ouest du pays. La longueur moyenne des liens est inférieure à celle du réseau à sept nœuds mais la longueur totale de fibre y est presque le double (tableau 4.8).

## Solutions traditionnelles

Le tableau 4.9 contient les solutions générées par le logiciel *NetCalc Optical Planner 3.1™* pour le réseau allemand 17 nœuds. Comme il n'y a pas de limite au nombre de longueurs d'onde par fibre, la solution qui présente une congestion de 82 longueurs d'onde est ici jugée valable. Cependant, les matrices de trafic choisies font en sorte que la congestion des liens pour les résultats traditionnels se situe aux environs de 80 longueurs d'onde. La valeur limite de longueurs d'onde pour les réseaux sans filtre est ici de 86.

**Tableau 4.9**  
**Sommaire des solutions traditionnelles**  
**pour le réseau allemand à 17 nœuds**

<b>Réseaux sans protection</b>		
<b>Objectif de routage (paramètre à minimiser)</b>	Nombre de segments	Coût
<b>Longueur moyenne des demandes (km)</b>	465	414
<b>Longueur maximale d'une demande (km)</b>	1213	951
<b>Nombre moyen de segments par demande</b>	2.7	2.84
<b>Nombre de demandes ayant plus de 2 segments</b>	143	146
<b>Nombre de longueurs d'onde</b>	56	82

## Solutions sans filtre proposées

Tableau 4.10

### Solutions sans filtre proposées pour le réseau allemand à 17 nœuds

Solutions	1	2	3	4	5
Paramètres d'optimisation (Tableau 4.1)	A	B et F	C	D	E
<b>Longueur du plus long arbre de fibres (km)</b>	1468	1241	1488	1372	1493
<b>Nombre d'arbres de fibres</b>	2	2	4	2	2
<b>Nombre de diviseurs optiques passifs</b>	52	58	24	60	44
<b>Nombre de branches optiques</b>	42	62	28	62	42
<b>Distance maximale de combinaison (km)</b>	1015	864	1331	1102	1127
<b>Degré de combinaison maximum</b>	4	4	2	4	3
<b>Longueur moyenne des demandes (km)</b>	480	475	619	492	535
<b>Longueur maximale d'une demande (km)</b>	1142	1192	1280	1229	1254
<b>Nombre moyen de segments par demande</b>	3,16	3,15	3,81	3,15	3,39
<b>Nombre de demandes ayant plus de 2 segments</b>	170	168	178	168	174
<b>Nombre de longueurs d'onde</b>	88	96	96	90	91
<b>Pourcentage de protection</b>	33	33	27	33	33

Le tableau 4.10 contient les caractéristiques des solutions sans filtre proposées pour le réseau allemand à 17 nœuds selon chacun des paramètres d'optimisation. Ces solutions affichent un nombre de longueurs d'onde supérieur à la limite imposée par les résultats traditionnels de

86. La figure 4.8 montre l'architecture de la solution 4 qui optimise le nombre moyen de segments par demande. La figure 4.9 représente un des arbres de fibres de cette solution.

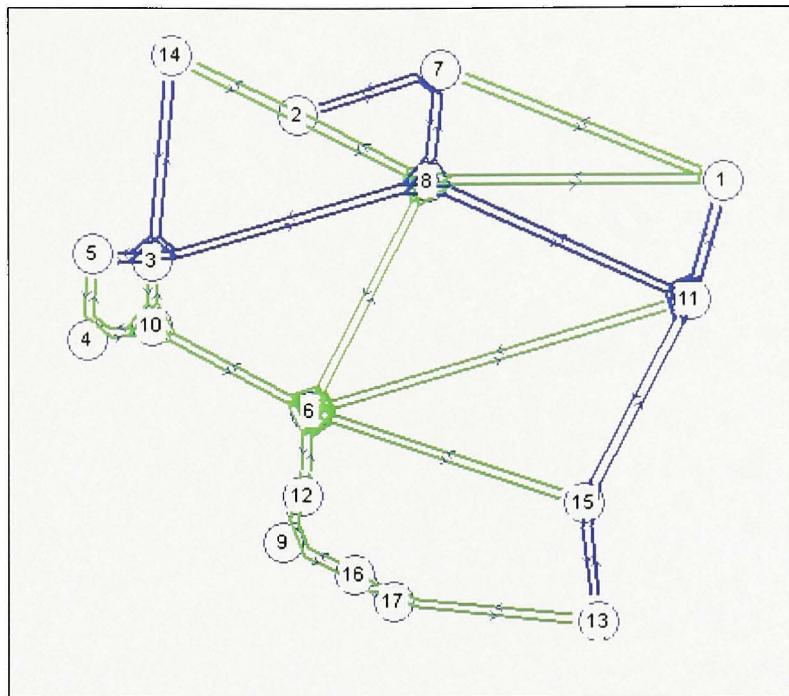
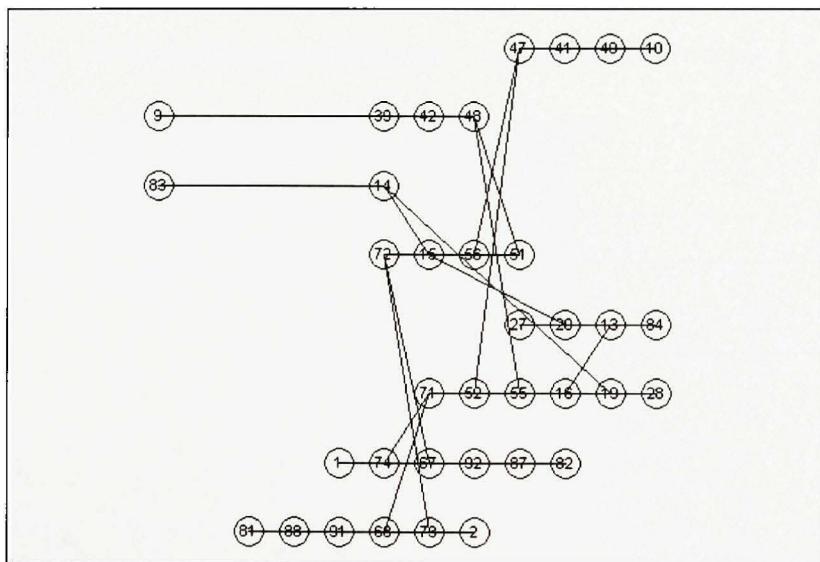


Figure 4.8 Solution sans filtre 4 du réseau allemand à 17 nœuds.



**Figure 4.9** Représentation par contacts d'un arbre de fibres de la solution 4.

#### 4.1.4 Réseau californien

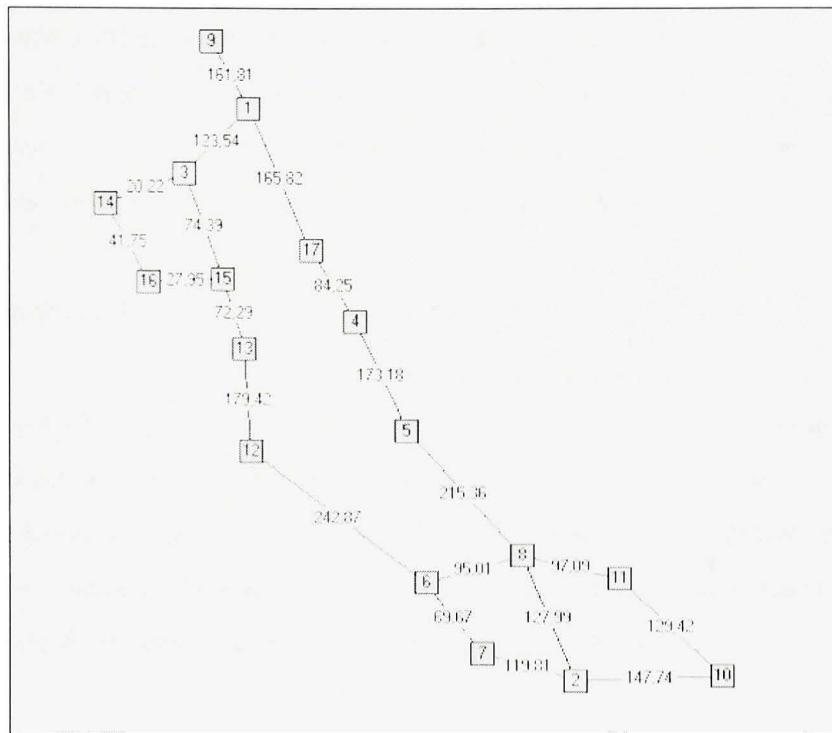


Figure 4.10 Topologie du réseau californien (Silvester et Reese, 2002).

Tableau 4.11  
Principales caractéristiques du réseau californien

<b>Nombre de nœuds</b>	17
<b>Nombre de liens</b>	20
<b>Degré minimum des nœuds</b>	1
<b>Degré maximum des nœuds</b>	4
<b>Degré moyen des nœuds</b>	2.35
<b>Longueur totale de fibre (km)</b>	2370
<b>Longueur minimale des liens (km)</b>	20
<b>Longueur maximale des liens (km)</b>	242
<b>Longueur moyenne des liens (km)</b>	118
<b>Diamètre du réseau (km)</b>	1027
<b>Nombre de demandes (10 Gigabits)</b>	272

La figure 4.10 montre la topologie du réseau californien tandis que le tableau 4.11 contient ses principales caractéristiques. Ce réseau optique se nomme CalREN et ses nœuds sont situés dans divers établissements d'enseignement de la Californie (Silvester et Reese, 2002). La longueur totale des liens est légèrement inférieure à celle du réseau allemand à sept nœuds mais le diamètre du réseau est supérieur à celui de tous les autres réseaux étudiés. Sa topologie se situe entre les réseaux maillés et ceux en anneaux.

### Solutions traditionnelles

Les résultats obtenus pour les solutions traditionnelles montrent un nombre moyen de segments par demande élevé comparé à celui des réseaux précédents (tableau 4.12). Aussi, la longueur moyenne des demandes et la longueur maximale d'une demande sont légèrement supérieures aux réseaux allemands à 17 nœuds. Les résultats concernant le nombre de longueurs d'onde fixent la limite des réseaux optiques sans filtre à 103.

**Tableau 4.12**  
**Sommaire des solutions traditionnelles pour le réseau californien**

<b>Réseaux sans protection</b>		
<b>Objectif de routage (paramètre à minimiser)</b>	Nombre de segments	Coût
<b>Longueur moyenne des demandes (km)</b>	462	446
<b>Longueur maximale d'une demande (km)</b>	1048	1027
<b>Nombre moyen de segments par demande</b>	3.5	3.53
<b>Nombre de demandes ayant plus de 3 segments</b>	130	130
<b>Nombre de longueurs d'onde</b>	76	90

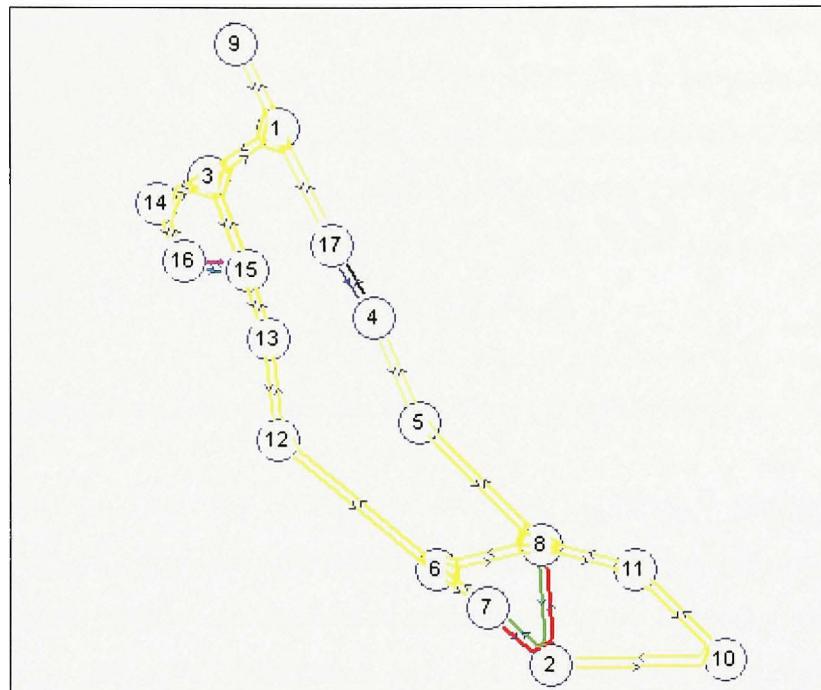
## Solutions sans filtre proposées

**Tableau 4.13**  
**Solutions sans filtre proposées pour le réseau californien**

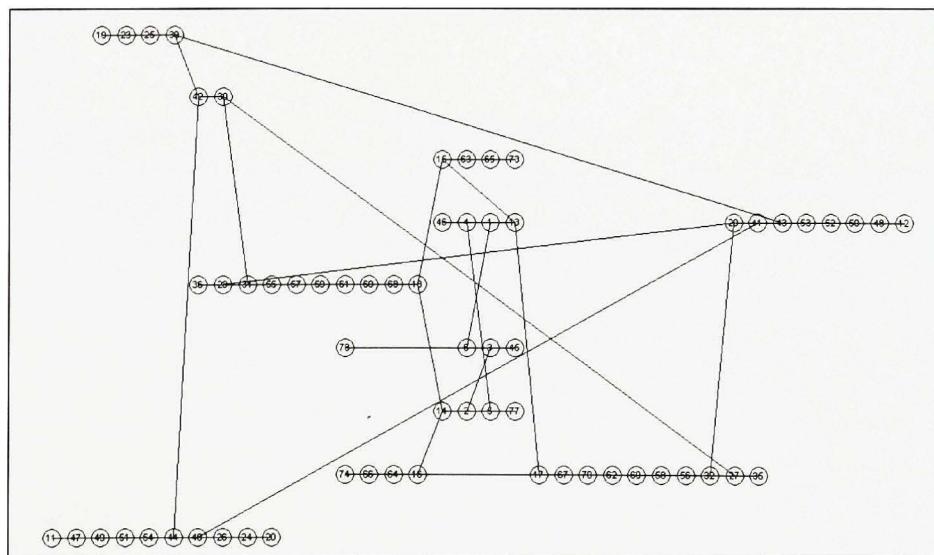
<b>Solutions</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>
<b>Paramètres d'optimisation (Tableau 4.1)</b>	<b>A</b>	<b>B et C</b>	<b>D</b>	<b>E</b>	<b>F</b>
<b>Longueur du plus long arbre de fibres</b>	1463	1479	1421	1463	1341
<b>Nombre d'arbres de fibres</b>	5	5	7	1	7
<b>Nombre de diviseurs optiques passifs</b>	12	6	28	20	24
<b>Nombre de branches optiques</b>	16	10	36	32	36
<b>Distance maximale de combinaison (km)</b>	1389	895	1061	800	1175
<b>Degré de combinaison maximum</b>	2	2	3	3	2
<b>Longueur moyenne des demandes (km)</b>	622	624	547	585	566
<b>Longueur maximale d'une demande (km)</b>	1463	1479	1421	1463	1337
<b>Nombre moyen de segments par demande</b>	4,57	4,76	4,13	4,23	4,41
<b>Nombre de demandes ayant plus de 3 segments</b>	166	170	150	152	156
<b>Nombre de longueurs d'onde</b>	120	121	124	129	125
<b>Pourcentage de protection</b>	4	4	4	22	4

Il y a cinq solutions sans filtre proposées pour le réseau californien (tableau 4.13). La solution 2 présente des résultats optimaux à la fois pour la distance maximale de combinaison et le nombre de diviseurs optiques passifs. Comme pour le réseau précédent, toutes les solutions proposées dépassent la limite du nombre de longueurs d'onde établi selon les

résultats des solutions traditionnelles. Les figures 4.11 et 4.12 représentent respectivement l'architecture et l'arbre de fibres principal de la solution 5.



**Figure 4.11 Solution sans filtre 5 du réseau californien.**



**Figure 4.12 Représentation par contacts d'un arbre de fibres de la solution 5.**

## 4.2 Analyse des résultats

La plateforme de conception et de simulation des réseaux optiques sans filtre génère une importante quantité d'information sur les réseaux créés qui doit être ensuite analysée pour comprendre les principes de base et les possibilités offertes par cette nouvelle architecture de réseau optique. La section suivante contient une analyse comparative entre les solutions traditionnelles et sans filtre, ainsi qu'une analyse statistique des paramètres des solutions sans filtre obtenus. De plus, certaines constatations sont émises en ce qui concerne la longueurs des arbres de fibre et les nœuds d'un réseau sans filtre.

### 4.2.1 Analyse comparative : réseaux sans filtre et traditionnels

Le tableau 4.14 présente les différences entre les meilleurs résultats des solutions traditionnelles et sans filtre pour trois paramètres de comparaison définis à la section 4.1 (un pourcentage positif signifie une augmentation de la valeur du paramètre pour une solution sans filtre). Une première observation est que les valeurs optimales se retrouvent généralement dans les solutions traditionnelles. En effet, mis à part le réseau allemand à sept nœuds, les solutions sans filtre ont une longueur moyenne des demandes, un nombre moyen de segments par demandes et un nombre de longueurs d'onde supérieurs à ceux des solutions traditionnelles.

**Tableau 4.14**

#### Différences entre les paramètres des solutions sans filtre et traditionnelles

Solutions sans filtre	Allemand 7 nœuds	Italien 10 nœuds	Allemand 17 nœuds	Californien 17 nœuds	Différence moyenne
Longueur moyenne des demandes (km)	nul	+ 7 %	+ 15 %	+ 18 %	+ 10 %
Nombre moyen de segments par demande	nul	+ 9 %	+ 16 %	+ 18 %	+ 11 %
Nombre de longueurs d'onde	- 7 %	+ 14 %	+ 59 %	+ 57 %	+ 31 %

Une deuxième observation concerne les différences entre les solutions traditionnelles et sans filtre tendent à augmenter avec le diamètre du réseau étudié. Une analyse plus approfondie devra être réalisée pour voir si cette tendance se maintient.

## Coût des réseaux

En ce qui concerne le coût d'un réseau optique, les composantes ayant le plus d'impact sont les commutateurs à l'intérieur des nœuds. Comme les solutions traditionnelles utilisent des ROADM ou des transmetteurs et récepteurs additionnels dans les nœuds, un réseau optique sans filtre composé de diviseurs optiques passifs a un coût nécessairement inférieur à celui d'un réseau traditionnel (Tremblay, Gagnon et Châtelain, 2006). Ceci est vrai dans le cas où la solution sans filtre permet de supporter la même quantité de trafic que la solution traditionnelle et ne nécessite pas des régénérateurs supplémentaires. Par contre, le coût relatif à l'augmentation du nombre moyen de segments par demande et de la longueur moyenne des demandes dans le cas des solutions sans filtre n'est pas considéré dans ce mémoire.

**Tableau 4.15**

**Tableau comparatif des coûts entre trois types de solutions pour le réseau allemand à sept nœuds**

Type de solutions	Composantes	Quantité	Prix Unitaire Normalisé	Total
Opaque	Transmetteurs Récepteurs	130	1	130
				<b>Coût total</b> 130
Commutateurs optiques	WSS	9	2.5	22.5
	Amplificateurs	18	1.3	23.4
				<b>Coût total</b> 45.9
Sans filtre	Diviseurs optiques passifs	64	0.02	1.28
				<b>Coût total</b> 1.28

(Modifié de Tremblay, Gagnon, Châtelain (2006, p.33))

Le tableau 4.15 décrit les coûts associés à chacun des types de solutions pour le réseau allemand à sept nœuds. Dans cet exemple, la solution sans filtre choisie est celle qui utilise le plus de diviseurs optiques passifs parmi les solutions proposées (solution 3). Le nombre total de diviseurs optiques passifs est calculé en additionnant ceux utilisés pour diviser et combiner le signal dans les arbres de fibres et ceux qui servent à injecter et extraire le trafic local des nœuds. Ces derniers sont présents à chacun des contacts des nœuds, ce qui équivaut, pour un réseau entier, à la somme des degrés de tous les nœuds multipliée par deux (les composantes présentes avant l'insertion ou après l'extraction du signal optique dans les nœuds ne sont pas considérées). Comme l'architecture des nœuds d'un réseau optique sans filtre n'est pas encore totalement définie, cette estimation représente la borne supérieure du nombre de diviseurs optique passifs nécessaires.

Lorsque la solution sans filtre utilise plus de longueurs d'onde que la solution traditionnelle (solutions sans filtre des réseaux allemand 17 nœuds et californien), deux options sont possibles pour permettre au réseau sans filtre de satisfaire la même quantité de trafic. La première est d'ajouter des liens optiques entre les nœuds. Cette solution entraîne des coûts élevés, elle n'est donc pas privilégiée dans ce mémoire. L'autre solution est d'ajouter des bloqueurs de longueurs d'onde pour réduire la congestion des liens et ainsi permettre au réseau de supporter un plus grand nombre de demandes. Cette solution est étudiée à la section 4.3. De plus, le coût associé à cet apport de composantes y est précisé.

En ce qui concerne le réseau allemand à sept nœuds et le réseau italien, les solutions sans filtre permettent de supporter la même capacité que les réseaux traditionnels. Il n'y a donc pas lieu d'ajouter des bloqueurs de longueurs d'onde. Selon les contraintes et les paramètres définis dans ce mémoire, elles représentent des alternatives économiques et fonctionnelles aux solutions optiques traditionnelles.

Les solutions sans filtre des réseaux allemands 17 nœuds et californien utilisent plus de longueurs d'onde que les solutions traditionnelles de ces réseaux. Donc, si une solution traditionnelle présente une congestion à la limite de la capacité de la fibre, elle ne pourra pas

être substituée par une des solutions sans filtre (sauf si des bloqueurs de longueurs d'onde sont ajoutés dans le réseau). Cependant, dans le cas de réseaux peu ou moyennement congestionnés, les solutions sans filtre proposées s'avèrent des alternatives fonctionnelles et ce, sans avoir recours aux bloqueurs de longueurs d'onde. Il faut toutefois s'assurer que la limite de congestion sur la fibre ne soit pas dépassée.

#### 4.2.2 Analyse statistique des solutions sans filtre

Pour chacun des réseaux étudiés, plus d'une centaine de solutions sans filtre ont été générées. À partir de ces solutions, certaines relations entre les caractéristiques physiques et les résultats de routage peuvent être formulées. Une analyse statistique de corrélation entre les paramètres des solutions<sup>1</sup> permet de confirmer certaines de ces relations. Les conclusions sont les suivantes :

- il y a une très forte corrélation inverse entre le nombre d'arbres de fibres d'une solution et le pourcentage de protection des demandes (corrélation moyenne = -0.80),
- il y a une forte corrélation inverse entre le nombre de diviseurs optiques passifs et le nombre moyen de segments par demande (corrélation moyenne = -0.72),
- il y a une forte corrélation inverse entre le nombre de diviseurs optiques passifs et la longueur moyenne des demandes (corrélation moyenne = -0.58).

Ces résultats soulignent deux caractéristiques des réseaux sans filtre. La première est que, pour maximiser la protection des demandes, peu d'arbres de fibres interconnectent un grand nombre de nœuds. Ils ont alors une grande longueur et/ou contiennent de nombreux diviseurs optiques passifs. Comme la longueur des arbres de fibre est limitée et que l'ajout de diviseurs optiques passifs affecte le budget de puissance, maximiser la protection des demandes provoque un impact négatif sur ces facteurs.

---

<sup>1</sup> Les corrélations sont calculées avec l'aide du logiciel R par la méthode de Pearson.

Une autre caractéristique des réseaux optiques sans filtre est que l'action d'ajouter des diviseurs optiques passifs réduit la longueur et le nombre de segments des demandes. En effet, cet ajout entraîne davantage de possibilités de routes pour les demandes. Comme l'ajout des diviseurs optiques passifs représente un coût pour le réseau, une étude doit être réalisée pour le comparer avec les coûts générés par l'augmentation de la longueur des demandes et du nombre de segments des demandes.

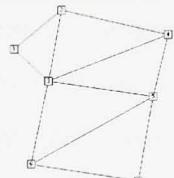
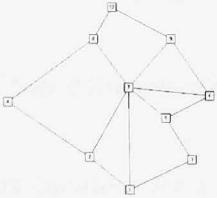
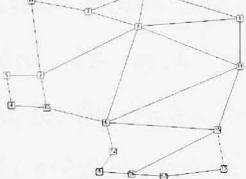
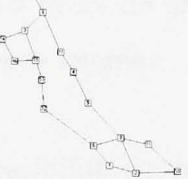
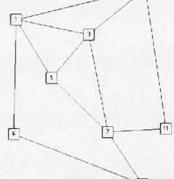
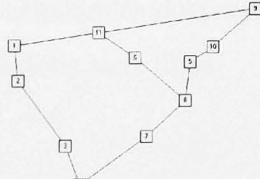
De plus, comme aucune corrélation entre le nombre de longueurs d'onde et les paramètres physiques des solutions n'a pu être établie, le nombre de longueurs d'onde utilisées ne dépend donc pas directement du nombre d'arbres de fibres, de la longueur des arbres de fibres ou du nombre de diviseurs optiques passifs. Cependant, une analyse de régression linéaire démontre qu'il y a effectivement une relation entre ces paramètres physiques et le nombre de longueurs d'onde mais que ce nombre dépend aussi largement de facteurs difficiles à évaluer. Effectivement, l'agencement des demandes placées sur les arbres de fibres ou la propagation du signal optique à travers le réseau influencent grandement le nombre de longueurs d'onde utilisées.

En conclusion, les solutions les plus intéressantes semblent être celles qui présentent le plus de contraintes physiques. En effet, la création de longs arbres de fibres qui comprennent beaucoup de diviseurs optiques passifs et qui supportent beaucoup de demandes entraîne des répercussions négatives tant du point de vue du budget de puissance et du bruit sur la ligne de transmission que sur la fiabilité du système en entier.

#### **4.2.3 Longueur des arbres de fibres**

Le tableau 4.16 montre la relation entre le diamètre d'un réseau et la longueur minimale des arbres fibres d'une solution sans protection. La tendance semble démontrer que plus un réseau a un grand diamètre, plus les arbres de fibres sont longs. Par contre, ce n'est pas nécessairement tous les arbres de fibres d'une solution qui sont plus longs mais seulement les arbres de fibres principaux (qui contiennent un grand nombre de demandes).

**Tableau 4.16**  
**Longueur minimale des arbres de fibres pour différents réseaux**

Réseaux	Topologie	Diamètre du réseau (km)	Nombre de liens / Longueur moyenne des liens	Longueur minimale des arbres de fibres
<b>Réseau Allemand (7 noeuds)</b>		690	11 / 235	825
<b>Réseau Italien (10 noeuds)</b>		830	15 / 229	990
<b>Réseau Allemand (17 Nœuds)</b>		951	26 / 170	1205
<b>Réseau Californien (17 noeuds)</b>		1027	20 / 242	1341
<b>Réseau Européen (8 noeuds)</b>		1393	12 / 441	1614
<b>Réseau Est - États-Unis (11 Nœuds)</b>		1924	12 / 372	2399

Lors des premières expérimentations où la combinaison du signal n'était pas considérée, la longueur minimale des arbres de fibres était de 1365 km pour le réseau allemand à sept nœuds. Maintenant, la solution avec combinaison qui obtient les meilleurs résultats pour ce paramètre est constituée d'un arbre de fibres de 838 km. C'est donc dire que la possibilité de combiner le signal entraîne une réduction de la longueur des arbres. Sans combinaison, la technologie sans filtre ne peut être utilisée que dans des réseaux de faible diamètre. Par contre, l'augmentation du nombre de diviseurs optiques passifs combinant le signal ne signifie pas nécessairement une réduction de la longueur des arbres de fibres; au delà d'un certain seuil, différent pour chaque réseau, l'ajout de diviseurs optiques passifs n'influence plus la longueur des arbres de fibres.

#### 4.2.4 Nœuds d'une solution sans filtre

Lorsque les diviseurs optiques passifs sont utilisés pour combiner les signaux, les nœuds de degré égal ou supérieur à trois contiennent généralement plusieurs connexions et sont donc fortement achalandés. La raison en est que cela diminue ainsi la longueur des arbres de fibres. Par exemple, les figures 4.13 et 4.14 montrent respectivement des solutions du réseau italien à 10 nœuds avec et sans la possibilité de combiner le signal. La solution avec combinaison du signal nécessite un arbre de fibres de 990 km et son nœud central contient beaucoup de connexions internes.

La solution sans possibilité de combinaison, quant à elle, contient beaucoup moins de connexions internes dans son nœud central mais la longueur de son plus long arbre de fibres est le double de la solution précédente, soit 1770 km. Par ailleurs, aucune solution du réseau italien avec une distance d'arbres de fibres inférieure à 1500 km n'a pu être générée sans combinaison du signal. Une étude portant sur les avantages et les inconvénients d'avoir des nœuds fortement achalandés doit maintenant être réalisée pour ainsi orienter les algorithmes de création de solutions sans filtre.

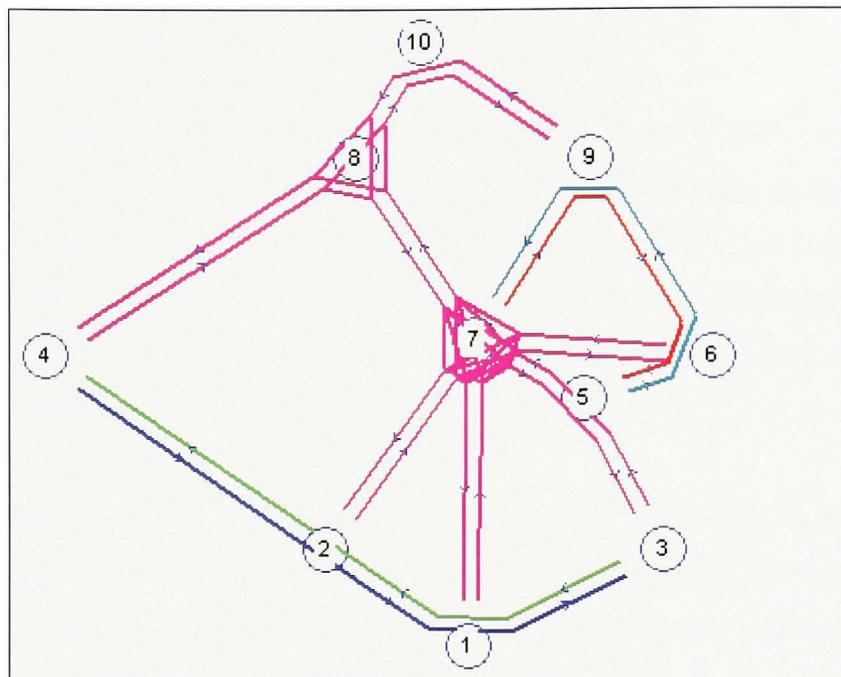


Figure 4.13 Solution du réseau italien à 10 nœuds avec combinaison du signal.

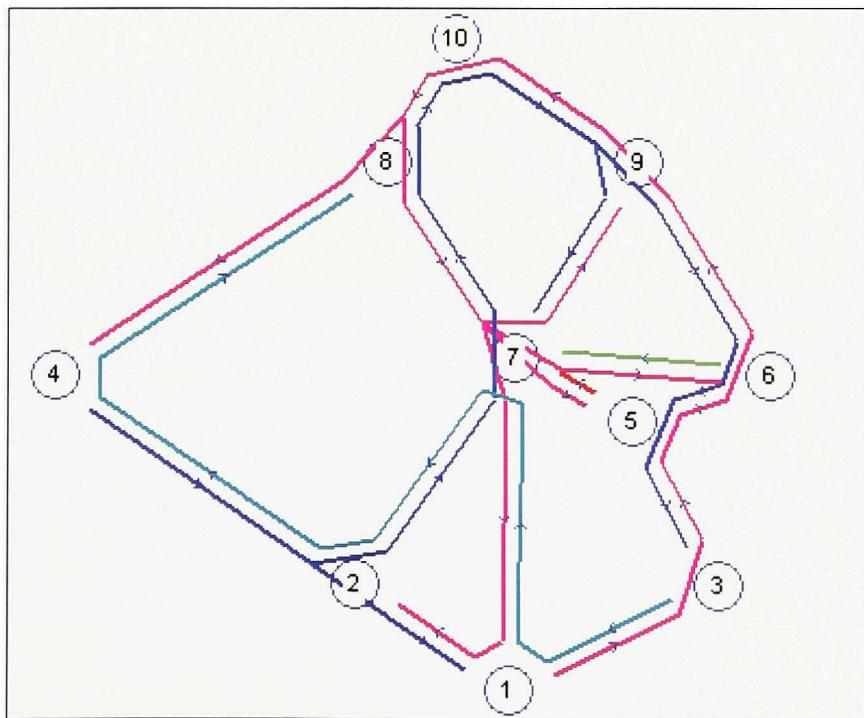


Figure 4.14 Solution du réseau italien à 10 nœuds sans combinaison du signal.

### 4.3 Résultats : bloqueurs de longueurs d'onde

Les résultats précédents du réseau allemand à 17 noeuds et du réseau californien indiquent un nombre plus élevé de longueurs d'onde utilisées dans les solutions sans filtre. Pour apporter une solution à ce problème, l'ajout de bloqueurs de longueurs d'onde doit être considéré. De plus, dans le contexte actuel d'accroissement de la demande en bande passante dans les réseaux de télécommunication, les bloqueurs de longueurs d'onde peuvent représenter une solution efficace pour augmenter la capacité des réseaux sans filtre.

Ces deux situations, où l'ajout de bloqueurs est nécessaire, sont évaluées dans les sections suivantes. Les analyses sont réalisées avec l'outil métaheuristique de placement de bloqueurs de longueurs d'onde intégré à la plateforme de conception et de simulation des réseaux optiques sans filtre (voir section 3.3.4).

#### 4.3.1 Réseaux allemand à 17 noeuds et californien

Dans cette section, les bloqueurs de longueurs d'onde sont ajoutés aux solutions des réseaux allemand à 17 noeuds et californien pour permettre d'amener le nombre de longueurs d'onde sous la limite définie par les résultats des solutions traditionnelles.

Le tableau 4.17 indique le nombre longueurs d'onde d'une solution sans filtre en fonction du nombre de bloqueurs ajoutés sur le réseau. Dans cette étude, la métaheuristique de placement des bloqueurs de longueurs d'onde a été utilisée sur deux solutions sans filtre de deux réseaux différents (réseau allemand à 17 noeuds et réseau californien). Les nombres de longueurs d'onde, indiqués en caractères gras, sont inférieurs à la limite imposée par les résultats des solutions traditionnelles.

Ces résultats montrent qu'il est possible de réduire le nombre de longueurs d'onde en ajoutant une certaine quantité de bloqueurs pour ainsi rendre la congestion d'un réseau optique sans filtre semblable à celle d'un réseau optique traditionnel.

Tableau 4.17

**Nombre de longueurs d'onde en fonction du nombre de bloqueurs pour différents réseaux optiques sans filtre**

<b>Réseaux et solutions</b>	<b>Nombre de bloqueurs de longueurs d'onde</b>								
	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>
<b>Allemand à 17 noeuds</b> <b>Solution 5 (Tableau 4.10)</b>	91	91	88	87	<b>85</b>	<b>84</b>	<b>82</b>	<b>80</b>	<b>80</b>
<b>Allemand à 17 noeuds</b> <b>Solution 2 (Tableau 4.10)</b>	96	96	92	91	89	88	88	<b>85</b>	<b>83</b>
<b>Californien</b> <b>Solution 1 (Tableau 4.13)</b>	120	114	112	111	<b>102</b>	<b>102</b>	<b>102</b>	<b>102</b>	<b>102</b>
<b>Californien</b> <b>Solution 2 (Tableau 4.13)</b>	121	120	112	108	110	105	<b>101</b>	<b>101</b>	<b>101</b>

Tableau 4.18

**Comparaison des coûts pour le réseau allemand à 17 noeuds**

Type de solution	Composantes	Quantité	Prix Unitaire Normalisé	Total
Commutateurs optiques	WSS	52	2.5	130
	Amplificateurs optiques	104	1.3	135.2
	<b>Coût total</b>			<b>265.2</b>
Filterless	Diviseurs optiques passifs	162	0.02	3.24
	Bloqueurs	7	1.9	13.3
	Amplificateurs optiques	14	1.3	18.2
	<b>Coût total</b>			<b>34.74</b>

(Modifié de Tremblay, Gagnon, Châtelain (2006, p.33))

Le tableau 4.18 montre les coûts associés à la solution sans filtre 2 du réseau allemand à 17 noeuds et les coûts de la solution avec commutateurs optiques pour ce même réseau. Malgré

le fait que cette solution sans filtre utilise sept bloqueurs, son coût est néanmoins grandement inférieur à celui de la solution traditionnelle (plus de 15 fois).

#### 4.3.2 Augmentation du trafic

La deuxième étude concerne l'impact qu'ont les bloqueurs de longueurs d'onde sur la réduction de la congestion lors d'une augmentation de trafic. Pour ce faire, la matrice de trafic du réseau allemand à sept nœuds (utilisée à la section 4.1.1) est multipliée par trois. La solution sans filtre 2 est choisie pour être comparée au cas traditionnel (tableau 4.4). C'est la solution à 35 longueurs d'onde qui minimise à la fois la distance maximale de combinaison et le nombre de diviseurs optiques passifs. Pour cette étude, la limite de longueurs d'onde par fibre est fixée à 80.

Le tableau 4.3 indique que le nombre minimal de longueurs d'onde d'une solution traditionnelle est de 30. Le fait de tripler la matrice de trafic provoque donc une augmentation de la congestion sur les liens d'un facteur trois. À cause de la limite imposée en longueurs d'onde, le réseau traditionnel n'est pas en mesure de satisfaire toutes les demandes puisqu'un de ses liens contiendrait 90 longueurs d'onde.

**Tableau 4.19**  
**Congestion maximale de la solution sans filtre 2**  
**(réseau allemand à sept nœuds)**

<b>Nombre de bloqueurs de longueurs d'onde</b>	0	1	2	<b>3</b>	<b>4</b>
<b>Nombre de longueurs d'onde</b>	105	99	90	<b>74</b>	<b>72</b>

Pour la solution sans filtre, la congestion maximale des liens atteint 105 longueurs d'onde lorsque la matrice de trafic est multipliée par trois. La solution n'est pas non plus en mesure de satisfaire toutes les demandes. Par contre, comme l'indique le tableau 4.19, l'ajout de trois bloqueurs permet de réduire le nombre de longueurs d'onde sous la limite des 80

longueurs d'onde et de supporter ainsi tout le trafic. Le tableau 4.20 contient les coûts spécifiques et globaux de cette solution en considérant seulement les diviseurs optiques passifs et les bloqueurs de longueurs d'onde.

**Tableau 4.20**  
**Coût de la solution sans filtre 2 du réseau allemand à sept nœuds**

Composante	Quantité	Prix unitaire	Total
Diviseurs optiques passifs	50	0.02	1
Bloqueurs de longueurs d'onde	3	1.9	5.7
Amplificateurs	6	1.3	7.8
<b>Coût total</b>		<b>14.5</b>	

(Modifié de Tremblay, Gagnon, Châtelain (2006, p.33))

Le coût total de la solution sans filtre est plus de trois fois inférieur à celui d'une solution avec commutateurs optiques et presque neuf fois inférieur à celui d'une solution opaque (voir tableau 4.15). De plus, la solution sans filtre peut supporter une augmentation de la matrice de trafic d'un facteur trois moyennant un ajout de trois bloqueurs, ce qui n'est pas possible pour la solution traditionnelle.

Ces résultats montrent l'importance de l'intégration du bloqueur de longueurs d'onde dans les réseaux optiques sans filtre. Son utilisation pour diminuer la congestion des liens ou pour permettre d'accroître le trafic sur le réseau représente évidemment un coût additionnel non négligeable mais, malgré cela, le coût global d'un réseau sans filtre reste considérablement inférieur à celui d'un réseau traditionnel.

## CONCLUSION

Ce mémoire porte sur les réseaux optiques sans filtre et la plateforme de conception et de simulation nécessaire à l'étude de ce nouveau type de réseau. Cette plateforme permet de concevoir des solutions d'architecture de réseaux optiques sans filtre, de simuler un trafic sur ces solutions, d'analyser les caractéristiques des solutions et de définir un emplacement pour les bloqueurs de longueurs d'onde. D'après les résultats obtenus, elle est pleinement fonctionnelle. De plus, ce mémoire contient des observations provenant de l'étude des solutions sans filtre obtenues. Malgré le fait que ces observations se basent sur un grand nombre de solutions et sur divers réseaux de référence, ces analyses devront être validées par une étude plus étendue sur des réseaux aux topologies et dimensions multiples en utilisant plusieurs schémes de trafic pour chacun des réseaux.

En ce qui concerne le module de placement des bloqueurs de longueurs d'onde, les résultats de ce mémoire montrent qu'il est fonctionnel mais encore une fois, l'étude réalisée porte sur un nombre limité de solutions sans filtre et doit maintenant être réalisée sur des situations plus complexes dans lesquels le trafic évolue dans le temps.

Les études et analyses contenues dans ce mémoire permettent de comprendre les concepts de base des réseaux optiques sans filtre et d'émettre certaines constatations relatives à la conception et à la simulation de ce nouveau type de réseau. Par exemple, les résultats montrent que la technologie sans filtre s'applique à des réseaux d'un diamètre inférieur à environ 1200 km (pour une longueur maximale des arbres de fibres de 1500 km). Aussi, les études comparatives démontrent que les coûts de la technologie sans filtre sont largement inférieurs à ceux des réseaux traditionnels. Comme les réseaux optiques sans filtre sont passifs, ils offrent également l'avantage d'offrir une alternative fiable aux technologies plus complexes (ROADM). L'étude sur le placement des bloqueurs de longueurs d'onde confirme quant à elle l'utilité de cette composante dans les réseaux optiques sans filtre. Elle révèle aussi que de placer des bloqueurs au centre des arbres de fibres ou des segments

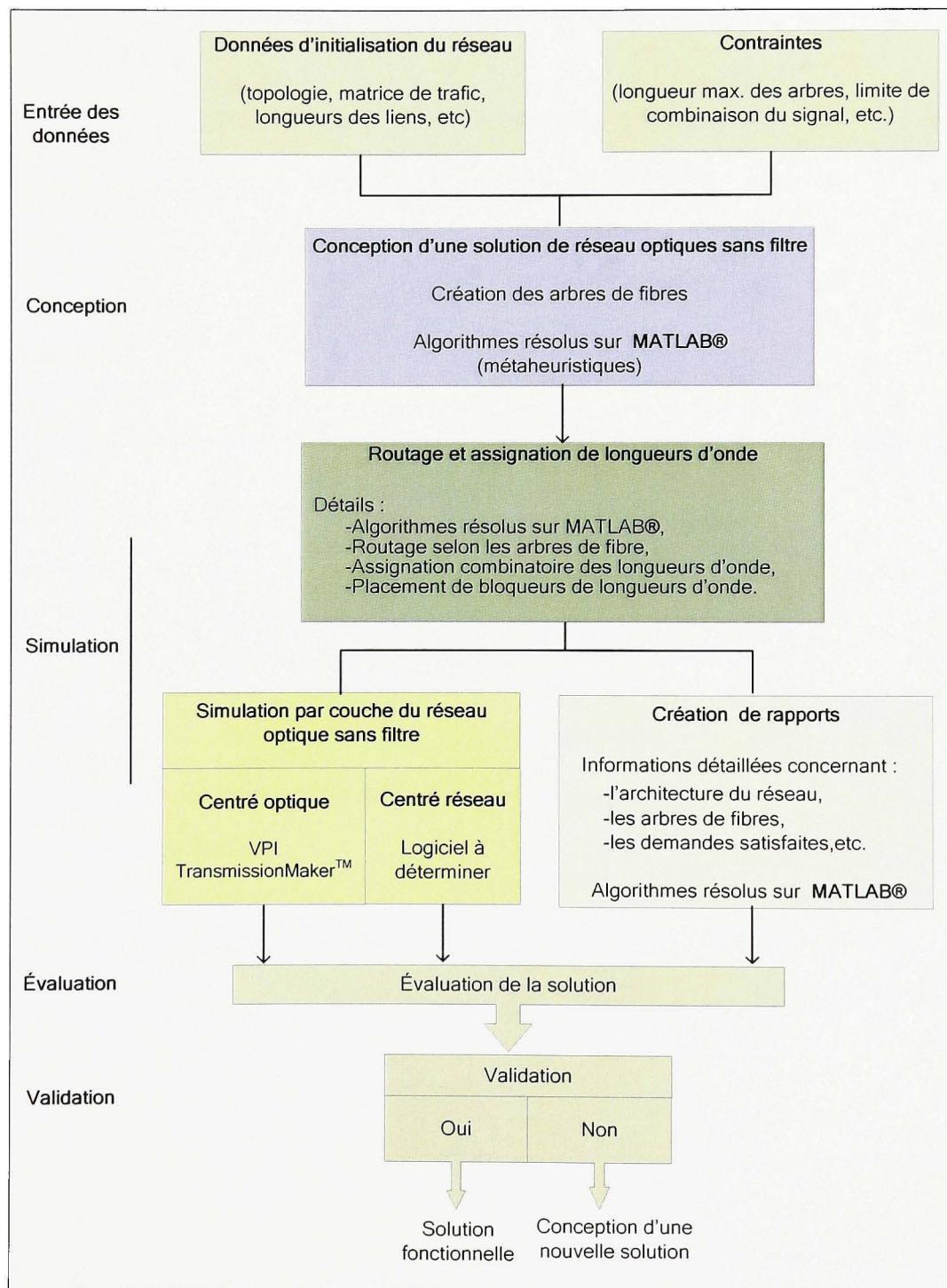
d'arbres de fibres permet de diminuer significativement le nombre de longueurs d'onde dans les réseaux optiques sans filtre.

Il ne faut pas non plus oublier que ces résultats portent sur des réseaux optiques sans filtre sans protection. Ce mémoire fait par contre ressortir différentes caractéristiques des réseaux sans filtre qui permettent de mieux cerner le problème de la protection dans ce type de réseau. Il reste à définir une stratégie de protection efficace et évaluer les propriétés de celle-ci par rapport aux approches traditionnelles.

Ce mémoire est une des étapes menant à l'élaboration de réseaux optiques sans filtre fiables et performants. Les prochaines étapes sont maintenant de pousser l'étude à des réseaux plus complexes, de définir précisément les contraintes physiques de la technologie sans filtre, de choisir le type de protection le plus approprié et ensuite d'étudier les problématiques de contrôle et de métrologie des réseaux optiques sans filtre.

## ANNEXE I

### DIAGRAMME DES ÉTAPES D'ÉLABORATION D'UNE SOLUTION SANS FILTRE



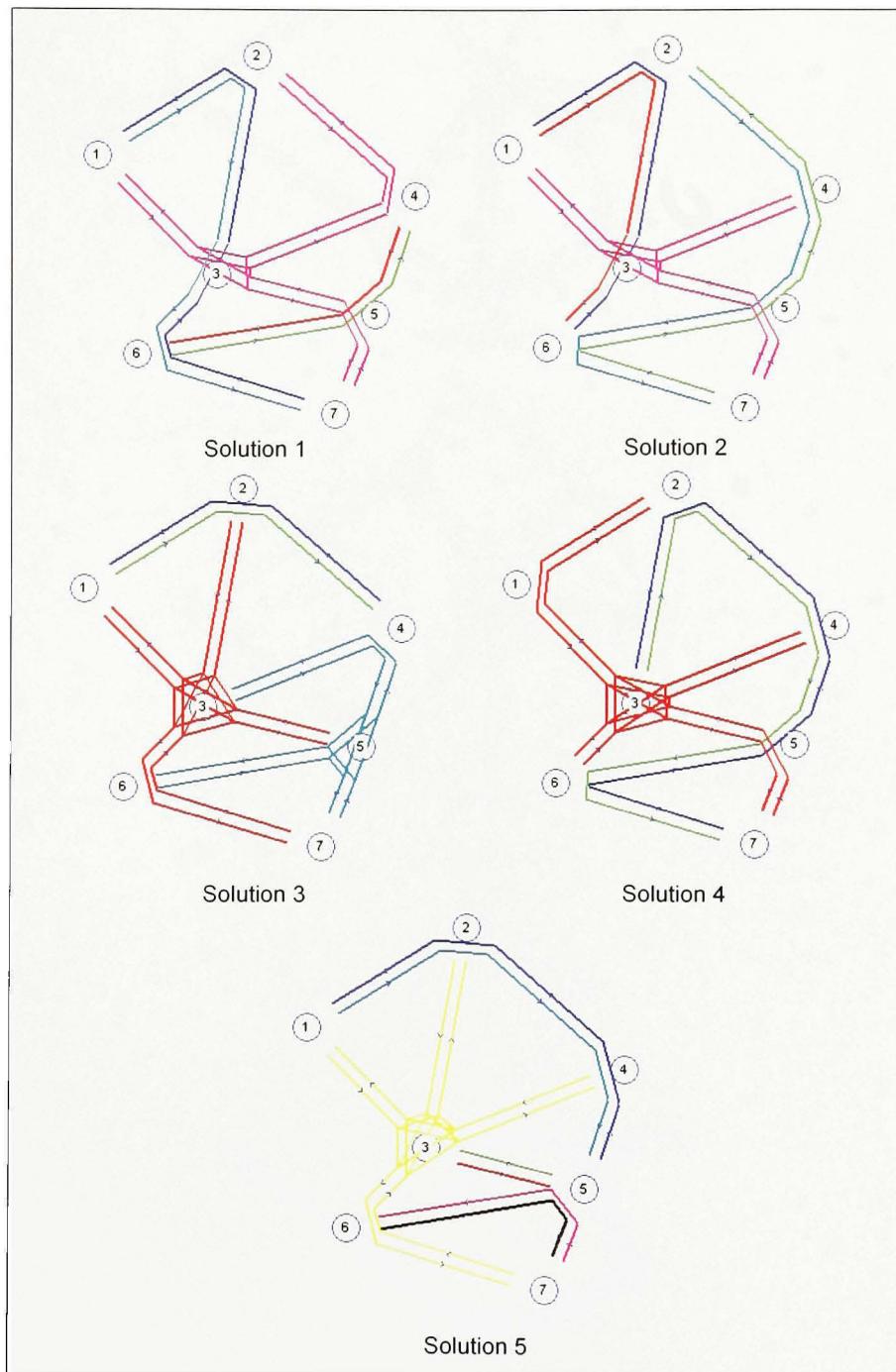
## ANNEXE II

### EXEMPLE DE RAPPORTS GÉNÉRÉS PAR LA PLATEFORME DE CONCEPTION ET DE SIMULATION

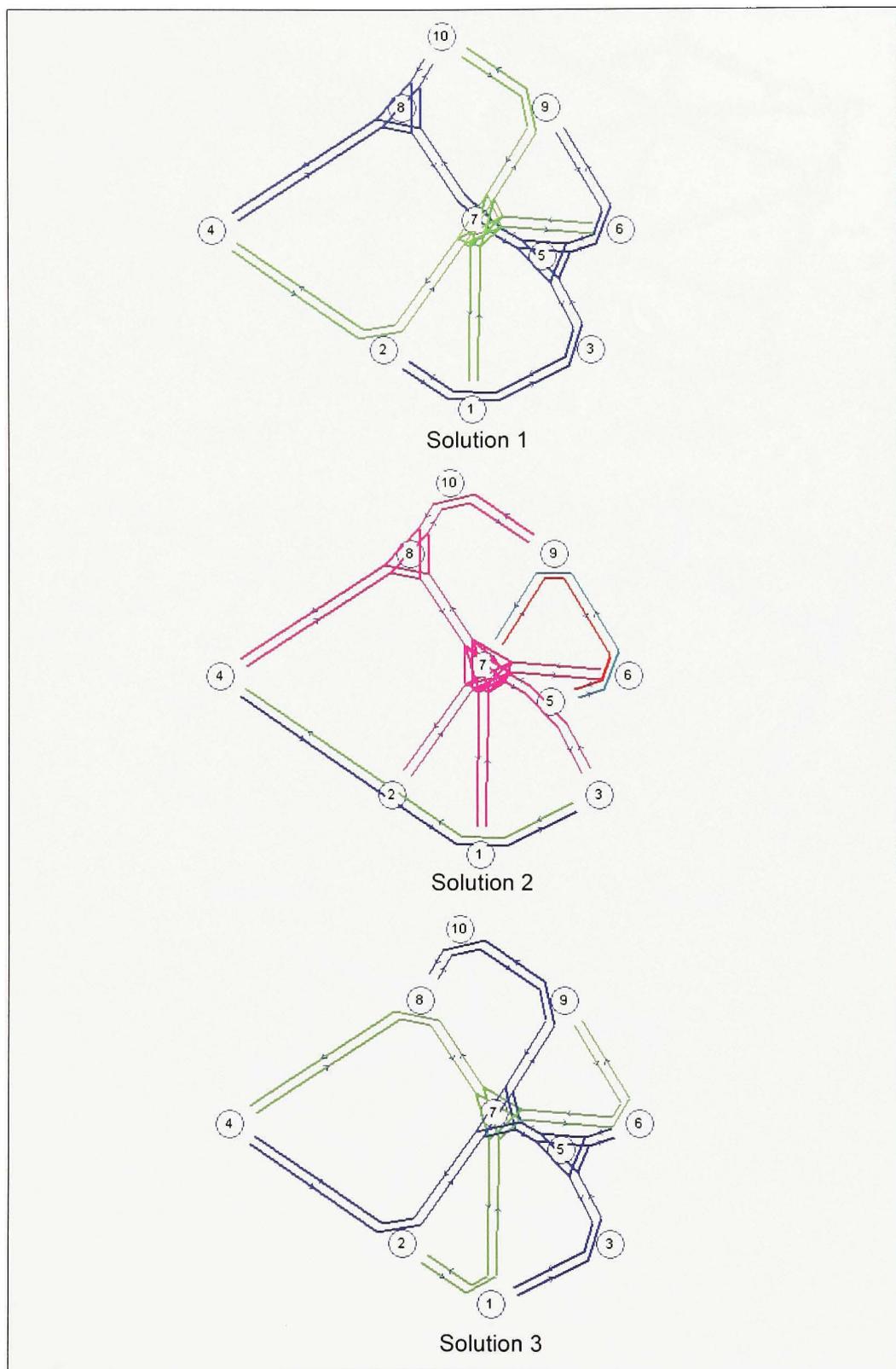
'Photonic Design Summary'	'LightFiber Summary'
Demand_Characteristics =	Global_Characteristics =
'Nb Demands' [ 272] 'Avg. Dem Length' [621.6176] 'Max (Km)' [ 1463] 'Min (Km)' [ 20] 'Avg. Span/Demand' [ 4.5735]	'Nb. LightFiber' [ 5] 'Max. Length' [1463] 'Nb. Optical Branchs' [ 16]
Span_per_Demand =	Analyse_Per_LightFiber =
'Nb. Spans' 'Nb. Demands' 'Percentage' [ 1] [ 40] [ 14.7059] [ 2] [ 36] [ 13.2353] [ 3] [ 30] [ 11.0294] [ 4] [ 32] [ 11.7647] [ 5] [ 32] [ 11.7647] [ 6] [ 32] [ 11.7647] [ 7] [ 28] [ 10.2941] [ 8] [ 22] [ 8.0882] [ 9] [ 12] [ 4.4118] [ 10] [ 6] [ 2.2059] [ 11] [ 2] [ 0.7353]	'LightFiber' [ 1] [ 2] [ 3] [ 4] [ 5] 'Nb. Branch' [ 1] [ 1] [ 1] [ 1] [ 12] 'Max. Length' [144] [225] [225] [144] [1463] 'Nb. Demands' [ 3] [ 3] [ 3] [ 3] [ 260]
'Wavelength Assignment Summary'	Passive_Optical_Splitters =
Wavelength_Assignment =	'Number of Split' [ 6] 'Degree Split' [ 2] 'Real Nb Split' [ 6] 'Number of Combining' [ 6] 'Degree Comb' [ 2] 'Real Nb Comb' [ 6] 'Max Comb Dist' [1389]
'Nb. Lambda' [120] 'Max. Congestion' [120]	'Cost Summary'
Max_Congestion_Link =	Network_Cost =
'LightFiber' 'Contact Origin' 'Contact Dest.' [ 5] [ 3] [ 45] [ 5] [ 74] [ 66]	'COMPONENT' 'Nb. Unit' 'Total K\$' 'Regen' [ 0] [ 0] 'Passive Splitter' [ 12] [ 2.4000] 'WB' [ 0] [ 0]

## ANNEXE III

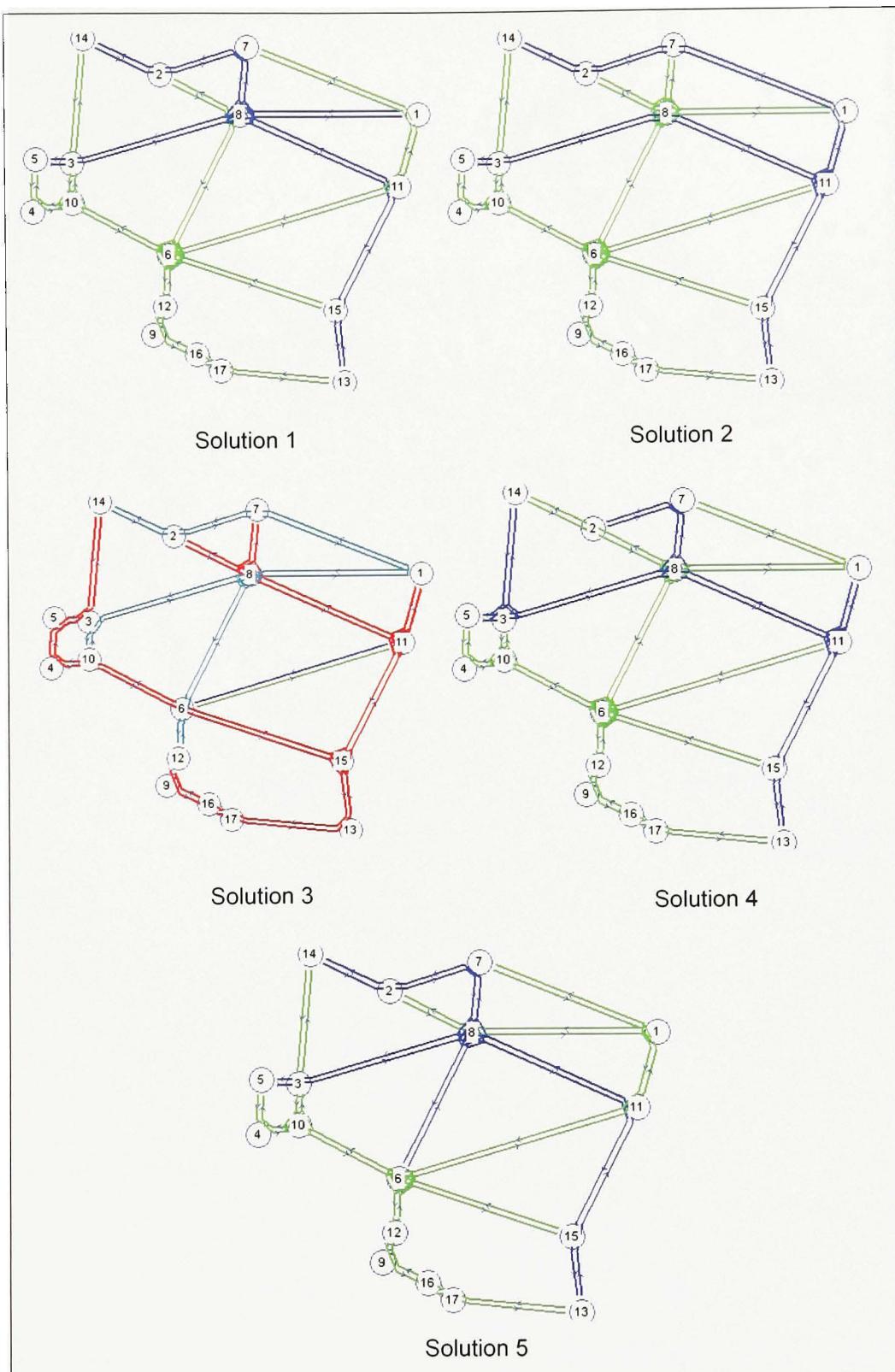
## REPRÉSENTATION GRAPHIQUE DES SOLUTIONS SANS FILTRE PROPOSÉES



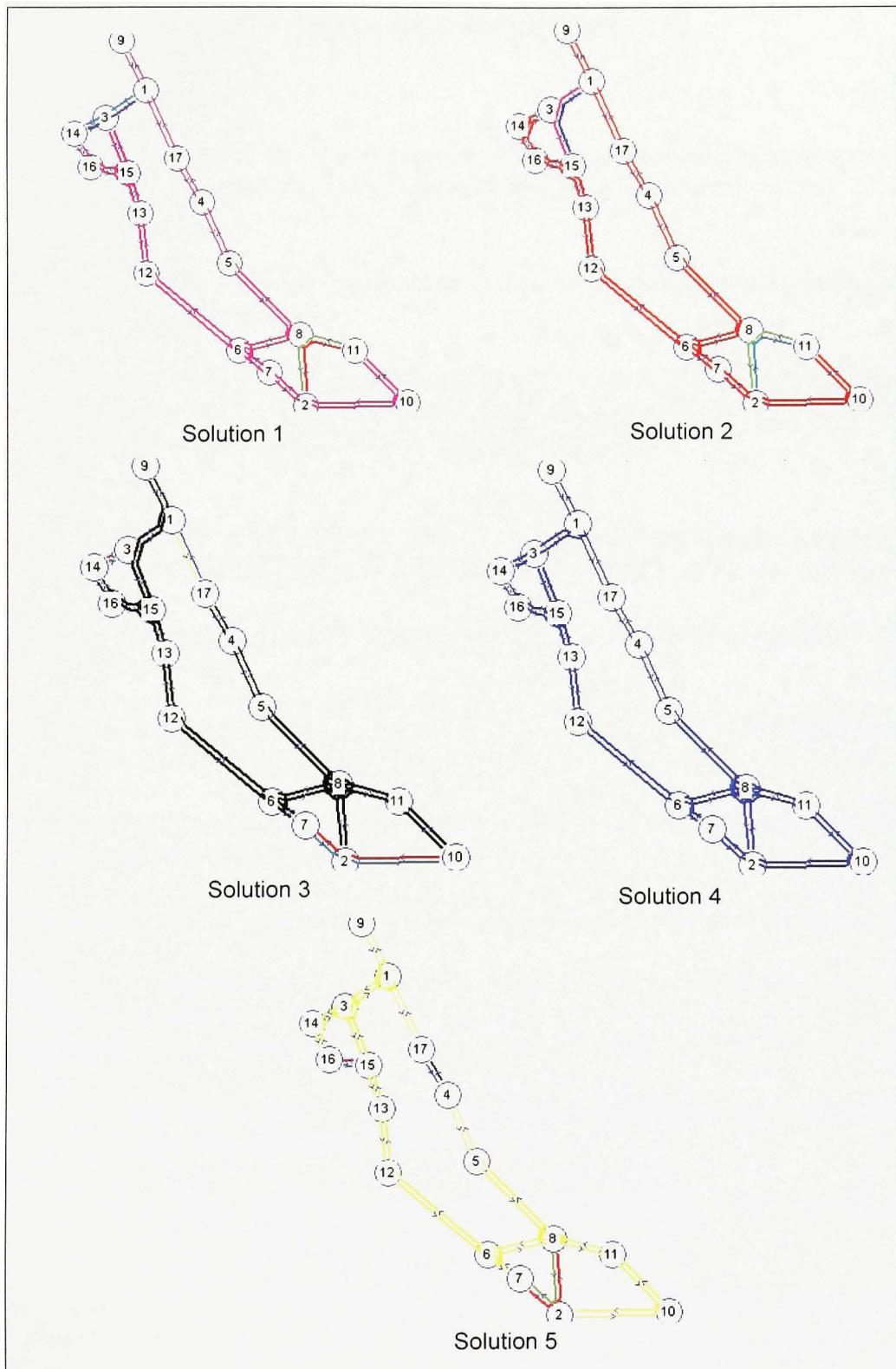
Réseau allemand à 7 nœuds



Réseau italien



Réseau allemand à 17 nœuds



## Réseau californien

## LISTE DE RÉFÉRENCES

- Ali, M. 2005. « Routing of 40-Gb/s Streams in Wavelength-Routed Heterogeneous Optical Networks ». Selected Areas in Communications, IEEE Journal on, vol. 23, n° 8, p. 1632-1642.
- Aramideh, Saeid. 2003. « Widely tunable lasers: Unleashing the power of intelligent optical networks ». Lightwave.
- Betker, Andreas , Christoph Gerlach, Ralf Hülsermann, Monika Jäger, Marc Barry, Stefan Bodamer, Jan Späth, Christoph Gauger et Martin Köhn. 2004. « Reference Transport Network Scenarios ». MultiTeraNet Project, Tech Report
- Boujelben, Y., J. Belhoste et S. Pierre. 2005. « A lightpath length-aware adaptive routing algorithm for WDM networks ». IEEE Communications Letters, vol. 9, n° 8, p. 750-2.
- Châtelain, Benoît. 2008. *Filterless Network Design - Architectural Insights* Montreal: McGill University.
- Choi, Jin Seek. 2003. « A functional Classification of Routing and Wavelength Assignment Schemes in Wavelength Routed Optical Networks: Static Case ». vol. 3, p. 277-282.
- Eldada, Louay. 2005. « Advances in ROADM Technologies and Subsystems ». Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, Proc. SPIE 5970B.
- Gumaste, Ashwin. 2003. *Future of Optical Networks From Uncertainties to Opportunities*.
- Heidemann, J., J. Heidemann, K. Mills et S. Kumar. 2001. « Expanding confidence in network simulations  
Expanding confidence in network simulations ». Network, IEEE, vol. 15, n° 5, p. 58-63.
- Hertz, A , et D de Werra. 1987. « Using Tabu Search Techniques for Graph Coloring ». Computing, Springer-Verlag, n° 39, p. 345-351.
- Keiser, Gerd. 2000. *Optical Fiber Communications*, 3ième Édition. Coll. « Communication and signal processing ». USA: McGraw-Hill, 602 p.
- Korniak, Janusz, et Pawel Rózycki. 2006. « GMPLS - simulation tools ». In *Proceedings of the 1st Conference “Tools of Information Technology”*. Rzeszow, Poland.
- Marino, Anna, Adam Prugel-Bennett et Celia A. Glass. 1999. « Improving graph colouring with Linear Programming and Genetic Algorithms ».

- MATLAB. 2008. *MATLAB Description*. En ligne. <[http://www.mathworks.fr/applications/t\\_m/description/](http://www.mathworks.fr/applications/t_m/description/)>. Consulté le 15 Mai 2008.
- Mitchell, Melanie 1998. *An Introduction to Genetic Algorithms*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Mukherjee, Biswanath 2006. *Optical WDM Networks*. Coll. « Optical Networks Series ». Davis, 954 p.
- Nortel Networks, Team. 2006. *Release 3.0 Tutorial*. Nortel Networks.
- OPNET Technologies, Inc. 2008. *OPNET Solutions*. En ligne. <<http://www.opnet.com/solutions/>>. Consulté le 15 mai 2008.
- Ramaswami, R. 2006. « Optical networking technologies: what worked and what didn't ». Communications Magazine, IEEE, vol. 44, n° 9, p. 132.
- Robin, J. Wilson. 1986. *Introduction to graph theory*. John Wiley & Sons, Inc.
- Silvester, John , et Dave Reese. 2002. *CalREN: Towards an Optical network*. CENIC.
- Tremblay, Christine, François Gagnon et Benoît Châtelain. 2006. *Filterless Optical Networks*. Ref. Agreement SER05-169. Montréal: École de Technologie Supérieure, Nortel.
- Troxel, Ian A. , Ramesh Balasubramanian, Chris Catoe, Jeremy D Wills et Alan D. George. 2003. « Virtual Prototyping of High-Performance Optical Networks for Advanced Avionics System ». High-performance Computing and Simulation (HCS) Research Laboratory.
- VPIsystems. 2008. *VPIphotronics Overview*. En ligne. <[http://www.vpiphotonics.com/pda\\_chart.php#](http://www.vpiphotonics.com/pda_chart.php#)>. Consulté le 15 mai 2008.