



FACULTÉ DE GÉNIE

DÉPARTEMENT DE GÉNIE ÉLECTRIQUE ET DE GÉNIE INFORMATIQUE

OPTIMISATION MULTICOUCHE DES RÉSEAUX OPTIQUES WDM :
HEURISTIQUES TABOU POUR LA RÉOLUTION À MOINDRE COÛT
DU PROBLÈME DE GROUPEMENT DE ROUTAGE ET D'AFFECTATION
DE LONGUEURS D'ONDES

THÈSE DE DOCTORAT
SPÉCIALITÉ : GÉNIE ÉLECTRIQUE

PAR
Mehdi Haïtami

MEMBRES DU JURY

Pr. Alain C. Houle (Directeur)
Pr. Ahmed Khoumsi (Codirecteur)
Pr. Philippe Mabilieu
Pr Steven Chamberland
Pr Jean-Pierre Dussault
Pr. Soumaya Cherkaoui

Mehdi HAÏTAMI

Sherbrooke (Québec), Canada

Décembre 2014

À mes parents

À mon épouse

À mes enfants

À tous ceux qui combattent le Cancer

Résumé

La fibre optique constitue le médium par excellence pour le transport d'information à haut débit. Elle forme l'épine dorsale de la majorité des réseaux optiques régionaux et métropolitains. La mise en œuvre à moindre coût de ce type de réseaux nécessite une planification rigoureuse des ressources pour satisfaire une demande de trafic de plus en plus exigeante en bande passante.

Le présent travail s'inscrit dans un cadre d'optimisation multicouche de réseaux optiques WDM. La principale contribution de cette thèse est de concevoir deux heuristiques Tabou, capable de résoudre le problème NP-complet de groupage, de routage et d'affectation de longueurs d'ondes GRWA (*Grooming, Routing and Wavelength Assignment*) dans un réseau optique WDM. La fonction objectif des heuristiques développées est de minimiser le coût de déploiement du réseau, autrement dit ses dépenses en capital (CAPEX), tout en maximisant son taux d'utilisation. Les contraintes réseaux à respecter sont celles du problème GRWA, augmenté des trois contraintes de la couche physique suivantes : le budget de puissance du signal optique, la quantité de dispersion chromatique qui s'y est accumulée et son rapport signal sur bruit optique (OSNR). Le coût du réseau est calculé en fonction de la quantité d'équipements optiques et optoélectroniques nécessaires pour satisfaire la demande de trafic. Les liens des réseaux optiques étudiés sont bidirectionnels composés de fibres optiques monomodes standard G-652 [1] opérant dans la fenêtre optique centrée autour de la longueur d'onde 1550 nm. Les nœuds sont équipés de plateformes multiservices (MSPP) supportant les protocoles SDH/SONET, GFP et LCAS/VCAT pour une gestion efficace de la bande passante. Le trafic considéré est statique de granularité multiple.

Mots-clés : Réseaux optiques WDM, MSPP, GRWA, optimisation multicouche, bruit optique, budget de puissance, dispersion chromatique, heuristique Tabou

Remerciements

Avant tout, je remercie le bon Dieu le tout miséricordieux de m'avoir donné l'occasion de réaliser ce modeste travail de recherche.

Je remercie mon directeur de recherche le professeur Alain C. Houle, pour son support, sa patience et sa disponibilité. Je le remercie pour toutes les connaissances et les conseils dont il m'a fait part tout au long de la réalisation de cette thèse.

Je remercie le professeur Ahmed Khoumsi pour sa disponibilité, son soutien et ses précieux conseils lors de la rédaction de cette thèse.

Je remercie les membres du jury d'avoir accepté d'examiner ce travail de recherche. Je les remercie pour leurs commentaires et suggestions durant toutes les phases de la rédaction de cette thèse.

Je remercie le personnel du département de génie électrique et informatique de l'université de Sherbrooke d'avoir mis à ma disposition toutes les ressources nécessaires à la réalisation de ce projet de recherche.

Je remercie mes collègues de laboratoire pour toutes les discussions remue-méninge que nous avons eu ce fût un plaisir de travailler avec vous.

En dernier mais non le moindre, je remercie mes parents et mon épouse pour leur soutien et leurs encouragements continus tout au long de mes années d'études.

Table des matières

RÉSUMÉ	1
REMERCIEMENTS	2
TABLE DES MATIÈRES	3
LISTE DES FIGURES	9
LISTE DES TABLEAUX	12
LISTE DES ACRONYMES	13
CHAPITRE 1 : INTRODUCTION	16
CHAPITRE 2 : ÉTAT DE L'ART	19
2.1 FIBRE OPTIQUE MONOMODE.....	19
2.1.1 <i>Propagation du signal optique</i>	20
2.1.2 <i>Atténuation du signal optique</i>	20
2.1.3 <i>Mesure de l'atténuation</i>	20
2.1.4 <i>Fenêtres optiques</i>	21
2.1.5 <i>Dispersion chromatique</i>	22
2.2 MULTIPLEXAGE TDM ET WDM.....	24
2.3 COMPOSANTS DE LA COUCHE PHYSIQUE DES RÉSEAUX OPTIQUES WDM.....	25
2.3.1 <i>Composants optiques actifs</i>	26
2.3.1.1 Transmetteurs optiques.....	26
2.3.1.2 Récepteurs optiques.....	28

2.3.1.3 Régénérateurs et amplificateurs optiques	28
2.3.2 <i>Composants optiques passifs</i>	30
2.3.2.1 Multiplexeur et démultiplexeur en longueur d'onde.....	30
2.3.2.2 OADM (Optical Add Drop Multiplexer).....	30
2.3.2.3 Compensateur de dispersion chromatique	31
2.4 PROCOLES DE LA COUCHE RÉSEAU DES RÉSEAUX OPTIQUES WDM	32
2.4.1 <i>SDH/SONET</i>	32
2.4.2 <i>Protocoles pour l'optimisation de la bande passante des réseaux optiques WDM</i>	34
2.4.2.1 Protocole de mise en trame générique (GFP)	34
2.4.2.2 Concaténation virtuelle (VCAT)	35
2.4.2.3 Ajustement de capacité de liaison (LCAS).....	37
2.5 PLATEFORME DE TRANSPORT MULTISERVICE (MSPP).....	37
2.5.1 <i>Caractéristiques des cartes de transport</i>	38
2.5.2 <i>Caractéristiques de l'amplificateur optique</i>	39
2.5.3 <i>Caractéristiques du compensateur de dispersion chromatique</i>	40
2.5.4 <i>Caractéristiques du multiplexeur et démultiplexeur en longueur d'onde</i>	41
2.5.5 <i>Caractéristiques de l'OADM</i>	41
2.6 CLASSIFICATION DES RÉSEAUX OPTIQUES WDM.....	42
2.7 MÉTAHEURISTIQUE TABOU	42
2.8 PROBLÈME GRWA	45
2.8.1 <i>Approches de résolution du problème GRWA</i>	46

2.8.2 Stratégies de routage	47
2.8.3 Stratégies d'affectation de longueurs d'ondes	48
2.9 OPTIMISATION MULTICOUCHES	49
CHAPITRE 3 : CONCEPTION DES HEURISTIQUES MULTICOUCHES DE RÉOLUTION DU PROBLÈME GRWA	51
3.1 STRATÉGIE MULTICOUCHE DE CONCEPTION DES RÉSEAUX OPTIQUES WDM	51
3.2 MODÉLISATION DU RÉSEAU OPTIQUE WDM.....	53
3.3 MODÉLISATION DE LA DEMANDE DE TRAFIC.....	54
3.4 TERMINOLOGIE POUR LA RÉOLUTION DU PROBLÈME GRWA.....	55
3.5 FORMULATION DU PROBLÈME GRWA.....	57
3.5.1 Hypothèses et contraintes de la couche réseau.....	58
3.5.2 Hypothèses et contraintes de la couche physique	59
3.5.2.1 Contrainte de dispersion chromatique	60
3.5.2.2 Contrainte de budget de puissance	60
3.5.2.3 Contrainte de bruit optique.....	62
3.6 ÉLÉMENTS DE CONCEPTION DE LA COUCHE RÉSEAU	66
3.6.1 Cartes de transports	71
3.6.2 Coût de la couche réseau	72
3.7 ÉLÉMENTS DE CONCEPTION DE LA COUCHE PHYSIQUE.....	73
3.7.1 La compensation de dispersion chromatique.....	73
3.7.1.2 Procédure d'ajout de compensateurs de dispersion chromatique.....	74
3.7.1.3 Coût de la compensation	74

3.7.2 <i>Le budget de puissance et l'amplification optique</i>	78
3.7.2.1 Procédure d'ajout d'amplificateurs optiques	79
3.7.2.2 Coût de l'amplification optique.....	80
3.7.3 <i>Le bruit optique et la régénération 3R</i>	80
3.7.3.1 Procédure d'ajout de régénérateurs 3R.....	81
3.7.3.2 Coût de la régénération 3R.....	82
3.8 HEURISTIQUES TABOU DE RÉOLUTION MULTICOUCHE DU PROBLÈME GRWA	82
3.8.1 <i>Heuristique Tabou multicouche d'optimisation séquentielle des réseaux optiques</i>	84
3.8.2 <i>Heuristique Tabou multicouche d'optimisation simultanée des réseaux optiques</i>	84
3.8.3 <i>Construction de la solution initiale</i>	86
3.8.4 <i>Exploration de l'espace de solutions</i>	86
3.8.5 <i>Gestion de la liste Tabou</i>	87
3.8.6 <i>Mouvement - MoveFlot</i>	87
3.8.6.1 MoveFlot-subset.....	88
3.8.6.2 MoveFlot –realizable.....	88
3.8.7 <i>Mouvement - RemovePort</i>	89
3.8.8 <i>Mouvement - RemoveCompensation</i>	89
3.8.9 <i>Mouvement - RemoveAmplifier</i>	90
3.8.10 <i>Évaluation d'une solution</i>	91
3.8.11 <i>Fonction objectif</i>	91
3.8.12 <i>Fonction d'évaluation</i>	92

3.9 APPROCHE D'EXÉCUTION DES HEURISTIQUES	98
3.9.1 Critère d'ordonnement des nœuds de l'heuristique Tabou séquentielle	99
3.9.2 Critères d'ordonnement des nœuds et des liens de l'heuristique Tabou simultanée	99
3.9.3 Modèle d'exécution des heuristiques Tabou	100
CHAPITRE 4 : MISE EN ŒUVRE DES HEURISTIQUES TABOU MULTICOUCHES DE RÉSOLUTION DU PROBLÈME GRWA	102
4.1 ARCHITECTURE LOGICIELLE	102
4.1.1 Modélisation du réseau optique	103
4.1.2 Modélisation du trafic	105
4.1.3 Modélisation des éléments de la métaheuristique Tabou	105
4.1.4 Modélisation des éléments du problème GRWA	108
4.2 FICHIERS DE CONFIGURATION EN ENTRÉE DES HEURISTIQUES	118
4.3 FICHIERS RÉSULTANT DE L'EXÉCUTION DES HEURISTIQUES	121
CHAPITRE 5 : RÉSULTATS ET DISCUSSION	123
5.1 SCÉNARIO D'EXPLORATION DE L'ESPACE DE SOLUTION	123
5.2 LE RÉSEAU NSFNET	125
5.3 RÉSULTATS D'EXÉCUTION DES HEURISTIQUES CLTABU_SEQ ET CLTABU_SIM	127
5.3.1 Paramètres d'exécution	127
5.3.2 Résultats	129
5.3.2.1 Solution NSF NA	129
5.3.2.2 Solution NSF NC	134
5.3.2.3 Solution NSF NCA	138

5.3.2.4 Solution NSF NAR.....	143
5.3.2.5 Solution NSF NCAR.....	147
CHAPITRE 6 : CONCLUSION.....	153
ANNEXE A	155
BIBLIOGRAPHIE	170

Liste des figures

Figure 2.1 : Fibre optique

Figure 2.2 : Propagation dans une fibre optique

Figure 2.3 : Atténuation et fenêtre optique de la fibre optique monomode

Figure 2.4 : Interférence inter-symbole

Figure 2.5 : Dispersion chromatique dans une fibre optique

Figure 2.6 : Dispersion chromatique dans les fibres *SMF*, *DSF* et *DFP*

Figure 2.7 : Multiplexage temporel TDM

Figure 2.8 : Multiplexage en longueur d'onde WDM

Figure 2.9 : Familles de composants optiques

Figure 2.10 : Modulation directe

Figure 2.11 : Modulation externe

Figure 2.12 : Bruit d'amplification optique

Figure 2.13 : Multiplexeur et démultiplexeur en longueur d'onde

Figure 2.14 : Chemin suivi par le signal optique dans un OADM

Figure 2.15 : Hiérarchie de multiplexage SONET

Figure 2.16 : Protocol GFP

Figure 2.17 : Concaténation fixe et concaténation contiguë

Figure 2.18 : Fragmentation de la bande passante

Figure 2.19 : Concaténation virtuelle

Figure 2.20 : Plateforme de transport multiservice MSPP

Figure 2.21 : Classification des réseaux optiques WDM

Figure 2.22 : Organigramme de la métaheuristique Tabou

Figure 2.23 : Exploration d'un espace de solutions non convexe

Figure 3.1 : Processus actuel de conception des réseaux optiques WDM

Figure 3.2 : Processus de conception des réseaux optiques WDM proposé

Figure 3.3 : Modélisation d'un réseau optique WDM

Figure 3.4 : MSPP avec MUX/DEMUX

Figure 3.5 : MSPP avec OADM

Figure 3.6 : Pré-amplification

Figure 3.7 : Amplification en ligne uniforme

Figure 3.8 : Amplification en ligne uniforme et Pré-amplification

Figure 3.9 : Exemple de réseau

Figure 3.10 : Exemple de flot interrompu

Figure 3.11 : Exemple de flot croisé

Figure 3.12 : Exemple de segments

Figure 3.13 : Les cartes de transport à un nœud donné

Figure 3.14 : Exemple de réseau avec compensation

Figure 3.15 : Approche Tabou multi-phase de résolution du problème GRWA

Figure 3.16 : Hiérarchie des solutions du problème GRWA en fonction des contraintes physiques

Figure 5.1 : Le réseau NSF

Figure 5.2 : Valeur de la fonction objectif multipliée par la réalisabilité de la solution NSF NA

Figure 5.3 : Valeur de la fonction objectif multipliée par la réalisabilité de la solution NSF NC

Figure 5.4 : Valeur de la fonction objectif multipliée par la réalisabilité de la solution NSF NCA

Figure 5.5: Valeur de la fonction objectif multipliée par la réalisabilité de la solution NSF NAR

Figure 5.6 : Valeur de la fonction objectif multipliée par la réalisabilité de la solution NSF NCAR

Liste des tableaux

Tableau 2.1 : Pertes d'insertions typiques dans un OADM

Tableau 2.2 : Débit des trames SONET et SDH

Tableau 2.3 : Débit des tributaires virtuels et des conteneurs virtuels

Tableau 2.4 : Taux d'utilisation de la bande passante avec et sans VCAT

Tableau 3.1 : Les débits supportés par les heuristiques développées

Tableau 3.2 : Coût des cartes de transport

Tableau 3.3 : Distance limite sans compensation

Tableau 3.4 : Coûts de la compensation

Tableau 3.5 : Coûts d'amplification

Liste des acronymes

3R: Re-shaping, Re-amplification, Re-timing

ANSI: American National Standards Institute

BER: Bit Error Rate

CAPEX : Capital Expenditure

DL: Diode Laser

DCF: Dispersion Compensating Fiber

DCU: Dispersion Compensating Unit

DEL: Diode électroluminescente

DFB : Distributed feedback Laser

DFF : Dispersion Flattened Fiber

DSF : Dispersion Shifted Fiber

DXC : Digital Cross connect

EDFA : Erbium Doped Fibre Amplifier

ESCON : Enterprise Systems CONnection

FICON : Fiber Connectivity

FOM : Figure Of Merit

GFP : Generic Framing Procedure

GR : Grooming, Routing

GRWA : Grooming, Routing and Wavelength Assignment

IEEE : Institute of Electrical and Electronics Engineers

ICBR : Impairment Constraint-Based Routing

IP : Internet Protocol

ITU-T : International Telecommunication Union

LCAS : Link Capacity Adjustment Scheme

MSPP : Multi-Service Provisioning Platform

NF : Noise Figure

OADM : Optical Add Drop Multiplexer

OC : Optical Carrier

OSNR : Signal To Noise Ratio

OSPF : Open Shortest Path First

PMD : Polarization-Mode Dispersion

PON : Passive Optical Network

RWA : Routing and Wavelength Assignment

SADM : SONET Add Drop Multiplexer

SAN : Storage Area Network

SDH : Synchronous Digital Hierarchy

SMF : Single Mode Fiber

SONET : Synchronous Optical Networking

STM : Synchronous Transport Module

STS : Synchronous Transport Signal

TDM : Time Division Multiplexing

VCAT : Virtual ConcATenation

VCG : Virtual Concatenation Group

VCSEL : Vertical Cavity Surface Emitting Laser

WA : Wavelength Assignment

WDM : Wavelength Division Multiplexing

Chapitre 1 : Introduction

De nos jours, les réseaux optiques sont capables de transporter l'information avec un débit pouvant facilement atteindre les 100 Gb/s grâce à la technique de multiplexage en longueur d'onde WDM. Celle-ci permet le transport simultané de plusieurs signaux optiques haut débits à l'intérieur d'une fibre optique. Cette technique trouve malheureusement ses limites lorsque le débit du signal WDM et/ou la distance parcouru par celui-ci augmente. Certains effets optiques apparaissent et détériorent la qualité du signal WDM, notamment la dispersion chromatique et le bruit optique qui distordent le signal et l'atténuation qui diminue sa puissance. D'autres effets non linéaires apparaissent aussi lorsque la densité de puissance du signal WDM dépasse un seuil limite [2][3].

La conception d'un réseau optique WDM nécessite la résolution du problème linéaire NP-complet de groupage, de routage et d'affectation de longueurs d'ondes GRWA (*Grooming, Routing and Wavelength Assignment*) [2]. Il s'agit en fait de trouver l'ensemble des chemins optiques pour satisfaire chacune des requêtes de la demande de trafic. Les contraintes du problème sont reliées à la capacité du réseau à router adéquatement la demande de trafic. Un exemple de fonction objectif serait de maximiser l'utilisation de la bande passante du réseau en maximisant l'utilisation de chacun des chemins optiques qui composent la solution du problème GRWA. Le coût du réseau est calculé en fonction du coût des équipements qui le composent.

Une solution optimale en nombre entier du problème GRWA n'est possible actuellement que pour des réseaux optiques dont le nombre de nœuds et de lien est réduit [4]. Sans quoi, sa résolution demanderait un temps de calcul et des ressources considérables [5]. De ce fait, les méthodes exactes ont cédé la place aux heuristiques, dont la solution s'approche progressivement de la solution optimale. Certaines heuristiques produisent des résultats assez proches de la solution optimale et leur efficacité a été démontrée dans le cas de plusieurs réseaux de grandes tailles [6][7].

La résolution du problème GRWA produit la couche réseau du réseau optique WDM en indiquant le chemin optique qu'emprunte chacune des requêtes de la demande de trafic. La

conception de la couche physique est réalisée de manière à supporter la couche réseau (solution du problème GRWA). Cette méthode de conception n'optimise pas le coût du réseau WDM car elle ne tient pas compte des contraintes de la couche physique responsable de l'ajout d'équipements optiques et optoélectroniques parfois très dispendieux.

Le travail présenté dans cette thèse s'inscrit dans un contexte d'optimisation multicouches, il s'agit d'optimiser simultanément les couches réseau et physique des réseaux optiques WDM par la résolution à moindre coût du problème GRWA. Les contraintes de la couche physique établissent des conditions sur le budget de puissance, la dispersion chromatique, et le bruit optique.

Ce travail de recherche fait suite à une étude présentée dans [8] qui propose une application de la métaheuristique Tabou pour la résolution du problème GRWA en tenant compte de la contrainte de dispersion chromatique. L'étude a établi une migration de la contrainte de dispersion chromatique vers la couche réseau afin de réduire au maximum le nombre de compensateurs de dispersion chromatique au profit d'un groupage et d'un routage optimal.

Les heuristiques d'optimisation développées dans le cadre de ce projet de recherche suivent le modèle de développement de l'étude faite dans [8]. Plus précisément, nous avons adapté l'heuristique d'optimisation multicouche développée dans [8] pour supporter en plus de la contrainte de dispersion chromatique, les contraintes de budget de puissance et de bruit optique. Nous avons ensuite développé deux variantes de la même heuristique pour optimiser séquentiellement et simultanément le coût de conception d'un réseau optique WDM. Notons aussi que les deux heuristiques ne tiennent pas compte des effets non linéaires, car elles se gardent de ne pas dépasser le seuil de densité de puissance au-delà duquel les effets non linéaires apparaissent.

La présente thèse se compose de six chapitres, le premier étant la présente introduction. Le deuxième est l'état de l'art dans lequel nous présentons les détails de la couche physique des réseaux optiques nécessaires à la résolution de la problématique. Nous décrivons ensuite la métaheuristique Tabou que nous avons choisie comme modèle d'algorithme pour la résolution du problème GRWA. Finalement nous passons en revue les principales publications traitant de

la résolution du problème GRWA en général et dans un contexte d'optimisation multicouches en particulier.

Dans le chapitre trois nous définissons les concepts clés pour l'élaboration des heuristiques multicouches de résolution du problème GRWA. Nous commençons par présenter une formulation générale du problème GRWA. Nous détaillons ensuite l'approche multicouche de résolution du problème GRWA en mettant l'accent sur la conception conjointe des couches réseau et physique. Finalement nous présentons le schéma global des deux heuristiques Tabou multicouches d'optimisation des réseaux optiques WDM que nous avons développés. La première optimise la couche réseau du réseau optique pour ensuite construire sa couche physique alors que la seconde construit et optimise simultanément les deux couches.

Le quatrième chapitre décrit notre mise en œuvre des deux heuristiques Tabou multicouches décrites au chapitre précédent.

Dans le chapitre cinq nous comparons les résultats des nos deux heuristiques afin de valider l'importance d'optimiser simultanément les couches réseaux et physiques des réseaux optiques WDM.

Finalement le chapitre six conclut et présente les travaux de recherches qui peuvent être entrepris suite au travail réalisé dans le cadre de cette thèse.

Chapitre 2 : État de l'art

Le présent chapitre constitue l'étude de l'état de l'art des réseaux optiques WDM, il est divisé en deux parties.

La première partie décrit les éléments de la couche physique des réseaux optiques WDM en commençant par la fibre optique monomode G-652 [1]. On y explique les causes des effets linéaires d'atténuation, de dispersion chromatique et de bruit optique. Nous présentons ensuite le principe du multiplexage en longueur d'onde WDM, suivi d'une classification des réseaux optiques WDM. Finalement, nous décrivons les protocoles SDH/SONET, GFP, LCAS/VCAT et la plateforme de transport multiservice MSPP.

La deuxième partie commence par expliquer le principe de la métaheuristique Tabou, nous décrivons ensuite le problème GRWA et passons en revue les principales publications traitant de sa résolution. Une revue de littérature sur la résolution du problème GRWA dans un contexte d'optimisation multicouche est aussi présentée.

2.1 Fibre optique monomode

La fibre optique monomode est composée de deux verres concentriques à base de silice. Le cœur au centre et la gaine qui l'entoure. Ces derniers sont généralement protégés par un double revêtement (figure 2.1). Son utilisation est très répandue dans les réseaux optiques WDM de longue portée [2], c'est pourquoi nous l'avons choisi comme support de transmission dans le cadre de notre travail de recherche.

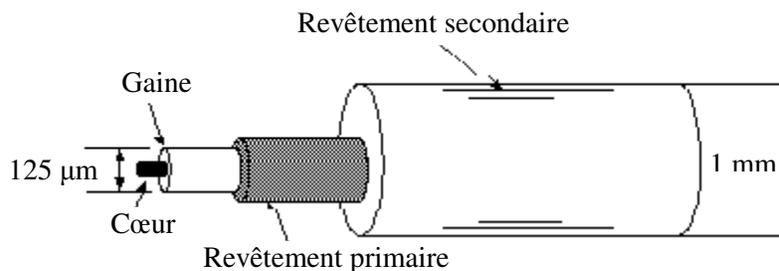


Figure 2.1 : Fibre optique [9]

2.1.1 Propagation du signal optique

La fibre optique est un guide d'onde dont l'indice de réfraction est variable. La propagation du signal optique y est possible grâce au phénomène de réflexion totale interne entre la gaine et le cœur de la fibre (figure 2.2).

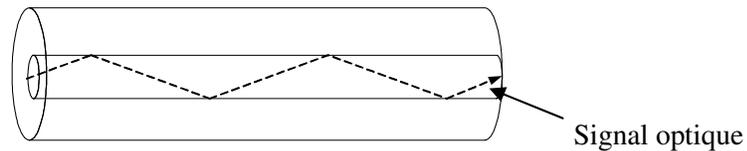


Figure 2.2 : Propagation dans une fibre optique

Deux conditions doivent être vérifiées pour qu'un signal optique puisse se propager à l'intérieur d'une fibre optique. La première est que l'indice de réfraction du cœur de la fibre n_c soit légèrement supérieur à celui de la gaine n_g . La deuxième est que le signal optique pénètre dans le cœur de la fibre à l'intérieur d'un cône d'angle α , inférieur à un angle critique α_{cr} défini par [9]:

$$\alpha_{cr} = \arcsin\left(\sqrt{n_c^2 - n_g^2}\right)$$

2.1.2 Atténuation du signal optique

L'atténuation réduit la puissance du signal optique au fur et à mesure qu'il se propage à l'intérieur de la fibre. Elle est principalement causée par les pertes intrinsèques de la fibre dues à deux phénomènes d'absorption et de diffusion de Rayleigh [10]. Il existe aussi d'autres sources d'atténuation dues à la courbure de la fibre, à la différence de l'indice de réfraction (Pertes de Fresnel) et au désalignement longitudinal, latéral ou angulaire [2].

2.1.3 Mesure de l'atténuation

Dans un contexte de communication par fibres optiques, la puissance de transmission P est de l'ordre du mW. L'unité de puissance est donc le dBm, définie comme suit :

$$P_{\text{dBm}} = 10 \log_{10} \frac{P}{1 \text{ mW}}$$

Une atténuation ou une amplification de puissance est représentée par un même facteur de multiplication sans dimension A_P .

$$A_P = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}}$$

P_{out} : puissance en sortie en W

P_{in} : puissance en entrée en W

Il y a amplification si $A_P > 1$ et atténuation si $A_P < 1$.

On utilise souvent le décibel pour caractériser une atténuation ou une amplification.

$$A_{\text{pdB}} = 10 \log_{10} A_P$$

Nous pouvons facilement vérifier en utilisant la propriété d'addition des fonctions logarithmiques que :

$$P_{\text{outdBm}} = A_{\text{pdB}} + P_{\text{indBm}}$$

2.1.4 Fenêtres optiques

Les signaux utilisés en communication optique sont infrarouges. Leur longueur d'onde est comprise entre 700 nm et 1600 nm. La figure 2.3 [11] montre la variation de l'atténuation de la fibre optique monomode G-652 [1] en fonction de la longueur d'onde. La courbe d'atténuation présente des pics aigus dus aux phénomènes d'absorption et de diffusion de Rayleigh [10]. Au voisinage de ces pics, trois sous domaines de longueurs d'ondes où l'atténuation est faible sont retenue pour la transmission optique. Ces sous-domaines sont appelés fenêtres optiques (figure 2.3).

La première fenêtre optique se situe dans la bande des 850 nm. C'est la première à être utilisée par les réseaux optiques. Le coût d'un réseau opérant dans cette fenêtre est faible, mais ses performances sont limitées.

La fenêtre optique centrée autour de la longueur d'onde 1310 nm est utilisée dans les réseaux optiques de courte portée. L'atténuation de la fibre y vaut 0.35 dB/km [1].

La fenêtre optique centrée autour de la longueur d'onde 1550 nm est utilisée dans les réseaux optiques WDM à longue portée car l'amplificateur à fibre optique dopée à l'Erbium EDFA n'opère qu'à cette longueur d'onde [12]. L'atténuation de la fibre y est à son minimum, elle se situe entre 0.2 et 0.3 dB/km [1].

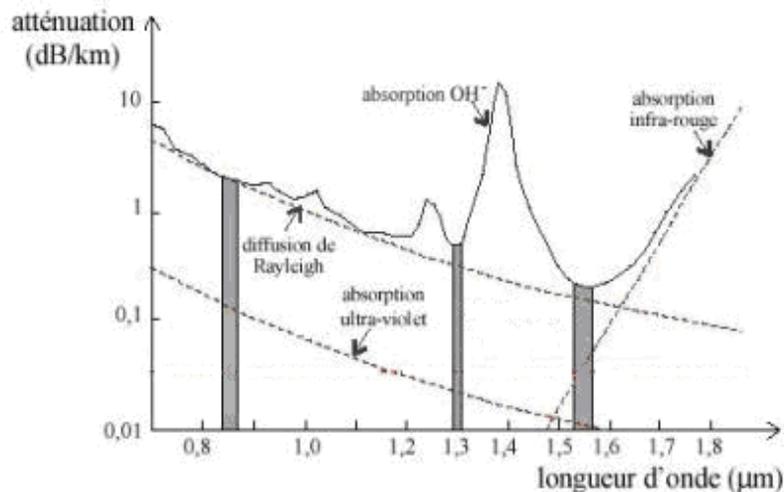


Figure 2.3 : Atténuation et fenêtre optique de la fibre optique monomode [11]

2.1.5 Dispersion chromatique

La dispersion chromatique dans une fibre se traduit par l'étalement temporel du signal optique au fur et à mesure que la distance parcourue par celui-ci augmente. Elle s'exprime en ps/nm. La conséquence directe de la dispersion c'est qu'elle crée de l'interférence inter-symbole. Celle-ci se traduit par une augmentation du taux d'erreurs binaires de la liaison optique.

L'interférence inter-symbole (figure 2.4) est due au fait que les impulsions optiques s'étalent après avoir parcouru une longue distance à l'intérieur de la fibre, et finissent par se chevaucher à destination.

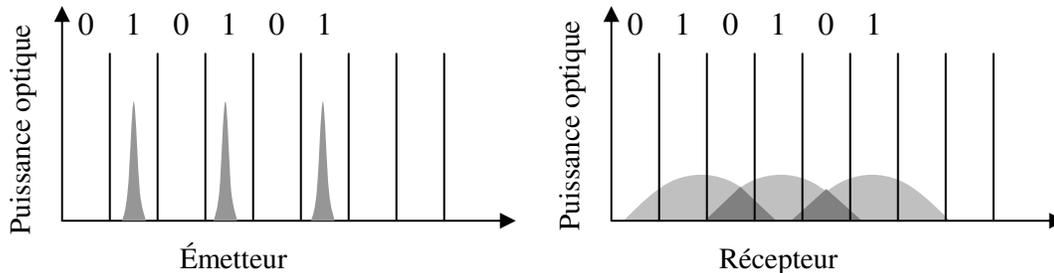


Figure 2.4 : Interférence inter-symbole

La dispersion chromatique dépend de la longueur d'onde. C'est pourquoi elle est dite chromatique. Elle résulte de la somme de deux phénomènes optiques : la dispersion propre au matériau et la dispersion du guide. Ces deux phénomènes sont dus principalement à la forme des profils d'indice de réfraction du cœur et de la gaine de la fibre optique (figure 2.5) [10].

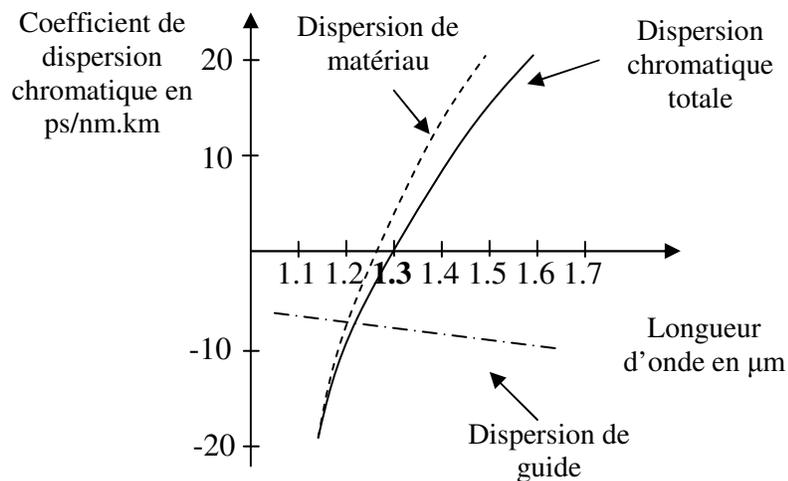


Figure 2.5 : Dispersion chromatique dans une fibre optique monomode G-652 [10]

Dans le graphique de la figure 2.5 on remarque que le coefficient de dispersion chromatique est nul à la longueur d'onde 1310 nm d'où son utilisation très répandue dans les réseaux optiques de courte portée.

La longueur d'onde 1550 nm est utilisée dans les réseaux optiques de longue portée, l'atténuation de la fibre optique monomode G-652 y est à son minimum, toutefois, son coefficient de dispersion chromatique y vaut 17 ps/(nm.km). Pour obtenir à la fois un minimum d'atténuation, et un coefficient de dispersion chromatique nul à la longueur d'onde 1550 nm (figure 2.6) [10], une fibre optique monomode à dispersion décalée DSF [13] a été conçue.

Une autre fibre optique monomode appelée DFF [11] permet d'obtenir deux valeurs nulles de dispersion chromatique aux longueurs d'ondes 1310 nm et 1550 nm (figure 2.6). Son principal inconvénient réside dans la complexité de la fabrication de son profil d'indice de réfraction.

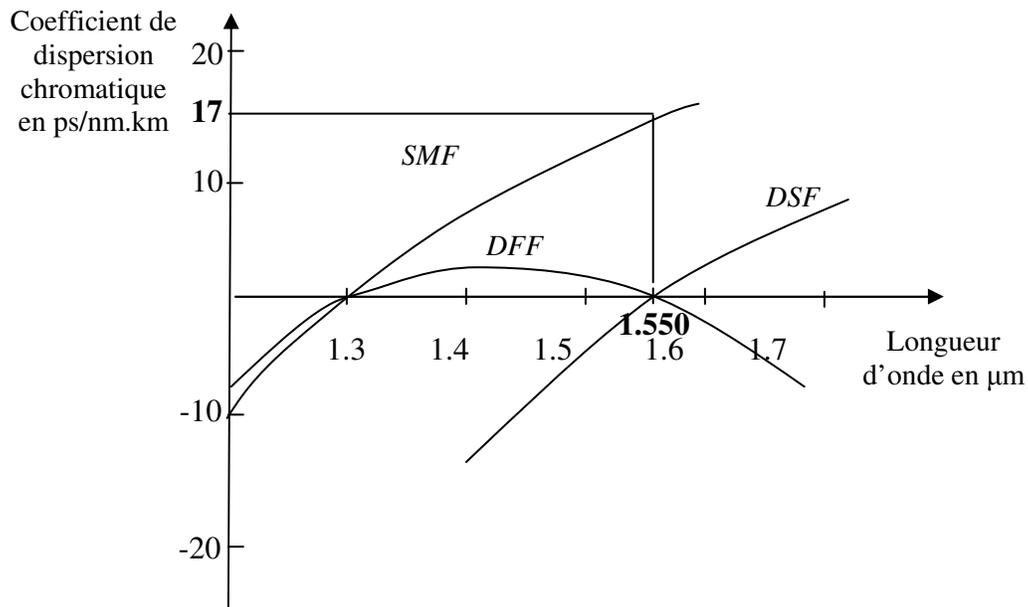


Figure 2.6 : Dispersion chromatique dans les fibres SMF, DSF et DFF [10]

2.2 Multiplexage TDM et WDM

Le multiplexage TDM (figure 2.7) consiste à découper le signal optique en périodes de courtes durées, sur lesquelles chaque signal électrique est codé. Si N signaux électriques ont chacun un débit B bit/s, le signal optique résultant du multiplexage TDM de ces N signaux, aura un débit de NB bit/s. Cette technique de multiplexage trouve rapidement ses limites à cause de la lenteur des équipements optoélectroniques.

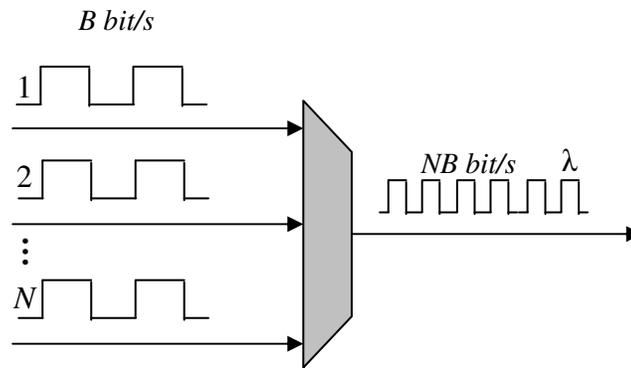


Figure 2.7 : Multiplexage temporel TDM

La technique de multiplexage en longueur d'onde WDM (figure 2.8) consiste à juxtaposer plusieurs signaux optiques hauts débits de longueurs d'ondes différentes sur une même fibre optique. Cette technique n'introduit aucune conversion optoélectronique. L'utilisation de la bande passante de la fibre optique est donc maximisée. Si N signaux optiques de longueurs d'ondes $(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N)$ ont chacun un débit B bit/s, le signal optique WDM résultant du multiplexage de ces N longueurs d'ondes aura un débit de NB bit/s.

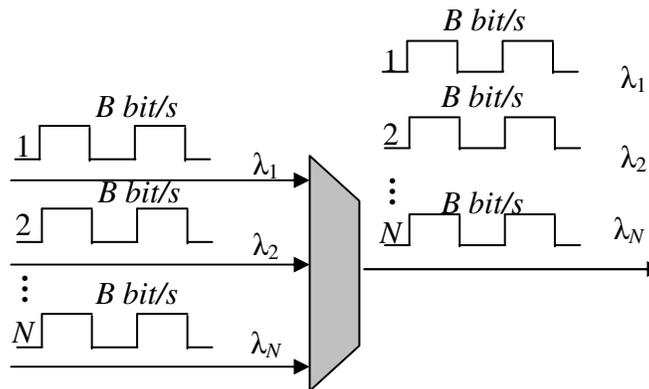
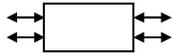


Figure 2.8 : Multiplexage en longueur d'onde WDM

2.3 Composants de la couche physique des réseaux optiques WDM

On distingue deux familles de composants dans les réseaux optiques WDM, les composants actifs et les composants passifs (figure 2.9).

Composants passifs



Composants actifs

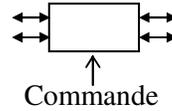


Figure 2.9 : Familles de composants optiques

Un composant optique est actif lorsque le signal qui le traverse subit une conversion électro-optique et qu'il est contrôlé par un signal de commande externe.

Les transmetteurs et les récepteurs optiques ainsi que les amplificateurs optiques sont des exemples de composants actifs.

Un composant optique est passif lorsque le signal qui le traverse ne subit aucune conversion électro-optique et qu'il n'est pas nécessaire d'utiliser un signal de commande pour le contrôler.

Il faut noter que dans un composant passif, le signal optique subit une perte d'insertion P_{loss} entre son entrée *in* et sa sortie *out* exprimée en dB par :

$$P_{loss} = 10 \log \frac{P_{in}}{P_{out}}$$

Avec p_{in} la puissance en entrée et p_{out} la puissance à la sortie

Les multiplexeurs en longueur d'onde et les OADM (*Optical Add Drop Multiplexer*) sont deux exemples de composants passifs.

2.3.1 Composants optiques actifs

2.3.1.1 Transmetteurs optiques

Les transmetteurs optiques exploitent le phénomène de photo-émission pour convertir un signal électrique en un signal optique proportionnel. Les transmetteurs optiques utilisés pour la transmission par fibre optique sont les diodes lasers DL et les diodes électroluminescentes

DEL. Les DEL ne sont pas étudiées dans le cadre de ce projet, car elles ne sont utilisées que dans des réseaux de courte portée à base de fibre optique multimode.

Les diodes lasers utilisées pour la transmission par fibre optique produisent un signal dans le domaine de l'infrarouge. Leurs longueurs d'ondes appartiennent à l'une des trois fenêtres optiques (850 nm, 1310 nm et 1550 nm). Le signal optique issu d'un laser a la particularité d'avoir une largeur spectrale étroite. Il est presque monochromatique et capable de parcourir une grande distance avant de subir l'effet de la dispersion chromatique. Les diodes lasers les plus utilisées en transmission optique sont celles de type Fabry Perot, DFB à contre réaction distribuée, VCSEL à base de semi-conducteur à cavité verticale et à émission par la surface.

Les principales caractéristiques des diodes lasers sont : la longueur d'onde d'émission qui dépend de la fenêtre optique utilisée (1310 ou de 1550 nm), la largeur spectrale, l'intensité du courant de seuil I_{th} et la puissance d'émission qui varie entre 1 mW (0 dBm) et 10 mW (10 dBm) [2].

Pour convertir un signal électrique en un signal optique, les diodes lasers utilisent l'une des deux techniques de modulation suivantes :

- La modulation directe : Elle est utilisée surtout avec des lasers à semi-conducteur. Elle contrôle la transmission d'un bit par la valeur du courant d'alimentation I . Lorsque l'intensité du courant d'alimentation est supérieure à l'intensité seuil I_{th} , un bit à 1 est transmis. Sinon c'est un bit à 0 qui est envoyé (figure 2.10) [2].

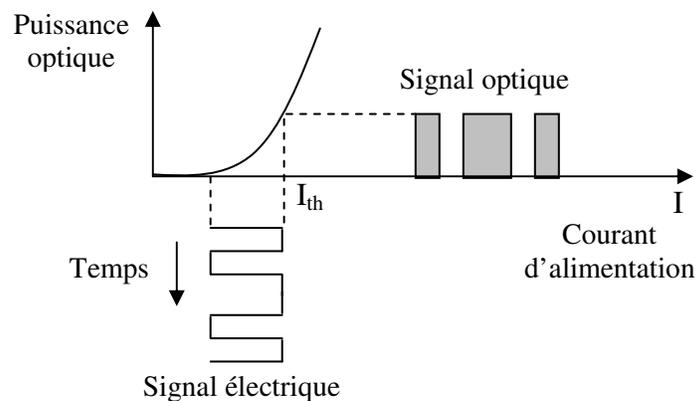


Figure 2.10 : Modulation directe [2]

-
- La modulation externe : Elle est utilisée lorsque la source laser est continue. Comme dans le cas des lasers de type Fabry Perot ou DFB à contre réaction distribuée. Le rôle du modulateur dans ce cas est de bloquer la lumière émise par le laser lorsqu'un bit à 0 doit être envoyé (figure 2.11). Les deux principaux modulateurs externes les plus utilisés en transmission optique sont : le modulateur à électro-absorption et le modulateur Mach-Zehnder. [2].

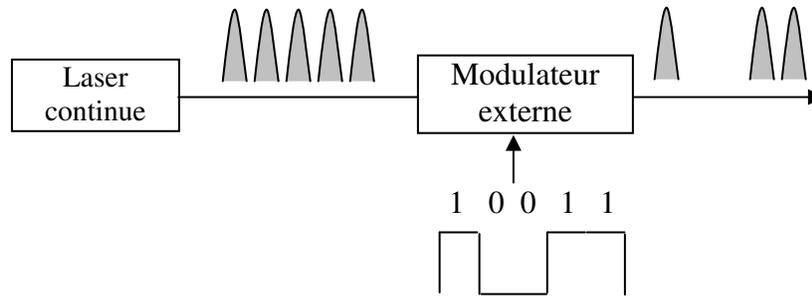


Figure 2.11 : Modulation externe [2]

Il faut noter qu'il existe une relation étroite entre la technique de modulation et la dispersion chromatique. Un signal issu d'une modulation directe a un spectre optique plus large. Par conséquent, il subira l'effet de la dispersion chromatique plus rapidement qu'un signal issu d'une modulation externe [2].

2.3.1.2 Récepteurs optiques

Les récepteurs optiques sont composés de photodiodes. Ils exploitent le phénomène de photo-détection pour convertir un signal optique en un signal électrique proportionnel. Les deux types de photodiodes les plus utilisées en transmission optique sont les photodiodes PIN (P : Semi-conducteur dopé positivement, I : Semi-conducteur intrinsèque, N : Semi-conducteur dopé négativement) et les photodiodes Avalanche APD.

2.3.1.3 Régénérateurs et amplificateurs optiques

Le signal optique est atténué au fur et à mesure qu'il parcourt de la fibre optique. Il subit aussi de la perte d'insertion chaque fois qu'il passe à travers un composant passif.

L'amplification optique est possible en utilisant soit un régénérateur 3R ou un amplificateur optique.

- Le régénérateur 3R récupère le signal optique, le transforme en un signal électrique, l'exempte de tout bruit, l'amplifie, le synchronise, le transforme en un signal optique et l'injecte à nouveau avec un niveau de puissance assez élevé pour atteindre sa destination. Il possède l'inconvénient de ralentir le signal optique lorsque celui-ci est converti en signal électrique. Il est aussi dépendant de la longueur d'onde du signal optique qui le traverse. Par conséquent, il faut un régénérateur 3R pour chaque longueur d'onde du signal optique WDM.
- L'amplificateur optique amplifie le signal dans le domaine optique, c'est-à-dire sans le convertir en un signal électrique. Ceci est possible grâce au phénomène d'émission stimulée de photon. Toutes les longueurs d'ondes d'un signal optique WDM sont alors amplifiées simultanément sans délai. Son principal inconvénient est qu'il introduit du bruit optique dans le signal (figure 2.12) [14].

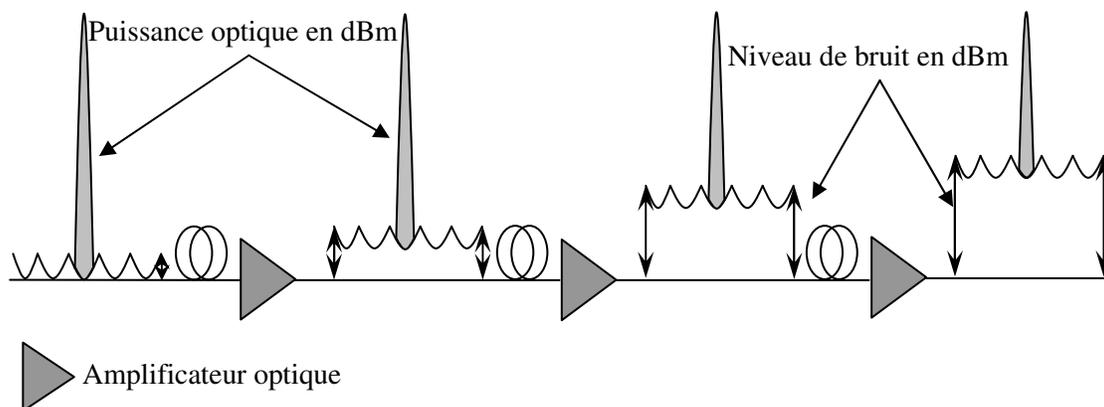


Figure 2.12 : Bruit d'amplification optique [14]

L'amplificateur optique le plus répandu est l'EDFA. Il possède un gain élevé et n'introduit pas de diaphonie.

L'EDFA amplifie les signaux optiques, dont le spectre optique appartient à la fenêtre optique 1525-1565 nm, appelée communément bande C. Cette restriction est à la base de l'utilisation de la longueur d'onde 1550 nm par les réseaux WDM de longue portée.

2.3.2 Composants optiques passifs

2.3.2.1 Multiplexeur et démultiplexeur en longueur d'onde

Le multiplexeur en longueur d'onde permet de grouper plusieurs signaux optiques de longueurs d'ondes différentes dans une même fibre optique. À la réception, l'opération inverse est effectuée par un démultiplexeur. Celui-ci décompose le signal WDM reçu pour reformer les signaux optiques initialement multiplexés (figure 2.13). Un multiplexeur peut être vu comme un ensemble de filtres de longueurs d'ondes.

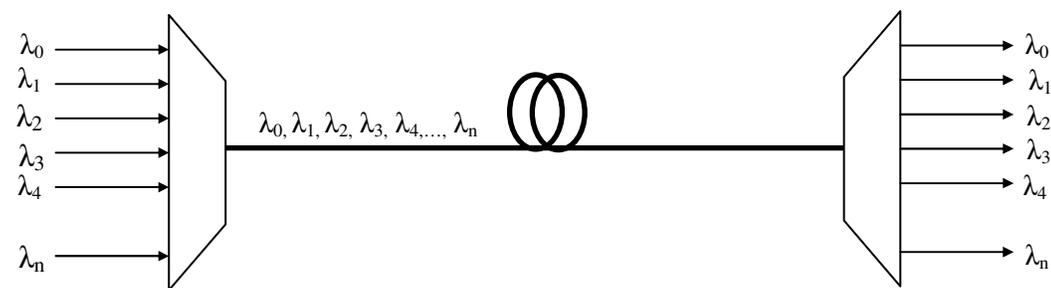


Figure 2.13 : Multiplexeur et démultiplexeur en longueur d'onde

Les pertes d'insertions du multiplexeur/démultiplexeur en longueur d'onde s'expriment par canal.

2.3.2.2 OADM (Optical Add Drop Multiplexer)

L'OADM est un composant optique capable d'ajouter ou d'extraire une longueur d'onde ou une bande de longueurs d'ondes d'un signal optique WDM. Les pertes d'insertions dépendent du nombre de canaux (longueurs d'ondes) et de la voie qu'emprunte le signal optique (tableau 2.1) [15]. On distingue quatre types de voies dans un OADM : la voie Composite-Express, la voie Express-Composite, la voie Add et la voie Drop (figure 2.14)

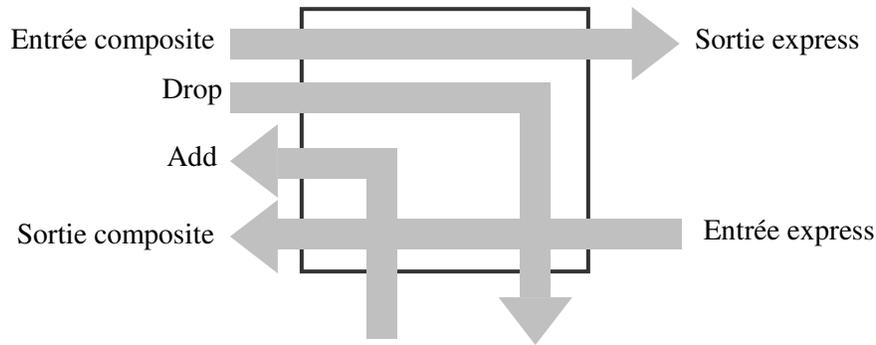


Figure 2.14 : Chemin suivi par le signal optique dans un OADM

Pertes d'insertion (dB)	Nombre de canaux de l'OADM		
	Un	Deux	Quatre
Add	2.6	3.1	4.9
Drop	2	2.4	5.3
Entrée express vers sortie composite	1.2	1.6	1.2
Entrée composite vers sortie express	2.4	2.7	2.7

Tableau 2.1 : Pertes d'insertions typiques dans un OADM [15]

2.3.2.3 Compensateur de dispersion chromatique

Le compensateur de dispersion chromatique DCU est fabriqué à base de fibre optique DCF. Celle-ci est capable d'annuler la quantité de dispersion chromatique accumulée dans un signal optique à cause de son coefficient de dispersion chromatique négatif.

Par exemple, si la fibre optique DCF a un coefficient de dispersion chromatique de -1360 ps/nm, un signal optique peut parcourir une distance de 80 km, avant de passer par un DCU pour annuler sa dispersion chromatique accumulé.

$$17 \text{ ps/nm.km} \times 80\text{km} = 1360 \text{ ps/nm}$$

Il faut noter que comme dans tout composant passif, lorsque le signal optique traverse le DCU il subit une perte d'insertion à cause de l'atténuation de la fibre optique DCF.

2.4 Protocoles de la couche réseau des réseaux optiques WDM

2.4.1 SDH/SONET

SONET (*Synchronous Optical Networking*) est le protocole standard américain des réseaux optiques. Il a été développé par Bellcore, puis standardisé par l'ANSI (*American National Standards Institute*) [16]. SDH (*Synchronous Digital Hierarchy*) est le standard international des réseaux optiques standardisé par l'ITU-T [17]. SONET et SDH sont similaires à l'exception de leur hiérarchie.

SONET définit sa hiérarchie à base de capacités optiques OC et de leur équivalent électrique STS. SDH définit sa hiérarchie à base de module STM.

La trame SONET de base STS-1 comporte 810 octets; soit 6480 bits envoyés toutes les 125

µs. Le débit de la trame SONET STS-1 est de $\frac{6480}{125 \cdot 10^{-6}} = 51,84 \text{ Mb/s}$.

Le débit de la trame STM-1 de SDH est le triple du débit de la trame STS-1 de SONET. Il correspond donc au débit d'une trame STS-3 = $3 \times 51,84 = 155,52 \text{ Mb/s}$.

Les débits respectifs des trames STS-N de SONET et STM-N de SDH sont obtenus en multipliant le débit de leurs trames de bases respectives par N. Le tableau 2.2 indique les débits des trames SONET et SDH [16]:

Trame SONET	Débit en Mb/s	Trame SDH
OC-1	51.84	-
OC-3	155.52	STM-1
OC-9	466.56	STM-3
OC-12	622.08	STM-4
OC-18	933.12	STM-6
OC-24	1 244.16	STM-8
OC-36	1 866.24	STM-12
OC-48	2 488.32	STM-16
OC-96	4 976.64	STM-32
OC-192	9 953.28	STM-64
OC-768	39 813.12	STM-256

Tableau 2.2 : Débit des trames SONET et SDH [16]

SONET et SDH définissent aussi un ensemble de signaux de faibles débits appelés respectivement tributaire virtuel et conteneur virtuel. Pour être transportés, ils sont multiplexés temporellement dans des trames SONET et SDH de haut débit.

Le tableau 2.3 indique les débits des tributaires virtuels et des conteneurs virtuels ainsi que leurs équivalents dans la hiérarchie téléphonique:

Tributaire virtuel	Débit en Mbps	Conteneur virtuel	Hiérarchie téléphonique
VT-1.5	1.544	VC11	T1 (DS1)
VT-2	2.048	VC12	E1
VT-3	3.152	-	DS1-C
VT-6	6.312	VC21	T2 (DS2)
	8.448	VC22	E2
	34.368	VC31	E3
	44.736	VC32	T3 (DS3)
	149.76	VC4	E4

Tableau 2.3 : Débit des tributaires virtuels et des conteneurs virtuels [18]

La figure 2.15 montre la hiérarchie de multiplexage SONET :

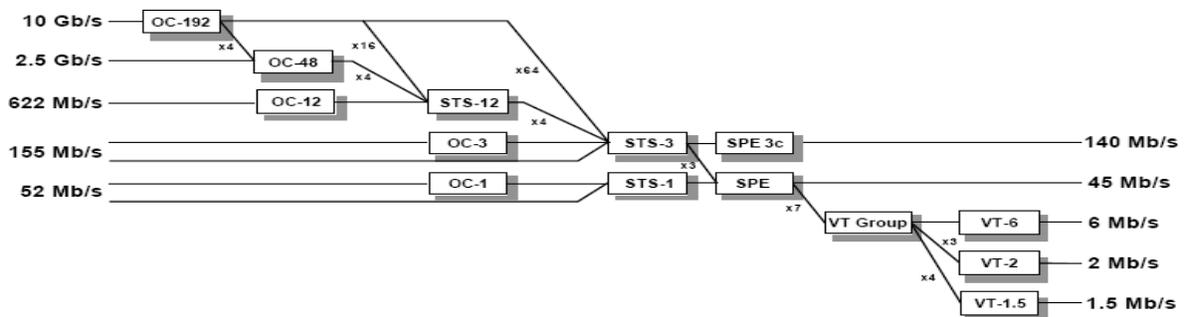


Figure 2.15 : Hiérarchie de multiplexage SONET [18]

2.4.2 Protocoles pour l'optimisation de la bande passante des réseaux optiques WDM

Initialement, les protocoles SDH/SONET ont été conçus pour le transport des signaux téléphoniques TDM entre les centrales téléphoniques. Avec l'apparition des applications multimédias et des réseaux de stockage SAN, les réseaux optiques WDM dont la couche physique est basée sur les protocoles SDH/SONET ont été forcés de transporter de la voix et des données. Les capacités optiques des protocoles SDH/SONET ne sont pas adaptées au transport des données, elles nécessitent la concaténation contiguë de plusieurs tributaires virtuels pour former de nouvelles capacités optiques. Il arrive parfois que ces nouvelles capacités ne soient pas supportées par les protocoles SDH/SONET. L'utilisation de capacités plus grandes est alors nécessaire. Il en résulte alors une perte de bande passante. Des protocoles pour l'optimisation de la bande passante des réseaux optiques basés sur les protocoles SDH/SONET ont été élaborés. Il s'agit de GFP [19][20] qui groupe efficacement les données issues de différents protocoles de faibles débits dans des trames SDH/SONET de haut débit et LCAS/VCAT [21][19] qui optimisent l'allocation de la bande passante.

2.4.2.1 Protocole de mise en trame générique (GFP)

GFP [20] réunit un ensemble de procédures standard qui permettent le groupage efficace de données issues de différents protocoles tels qu'Ethernet, Gigabit Ethernet, FICON (*Fiber Connectivity*), ESCON (*Enterprise Systems CONnection*), et Fibre Channel dans des trames SDH/SONET. Ces procédures peuvent être vues comme une couche intermédiaire entre une couche cliente formée de protocoles de faibles débits et une couche de transport formée de protocoles de haut débit SDH/SONET (figure 2.16) [22]. Selon le type du signal client, des en-têtes sont ajoutés à la trame afin qu'elle soit conforme aux en-têtes des trames SDH/SONET.

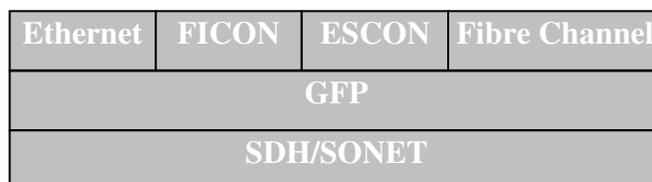


Figure 2.16 : Protocol GFP

2.4.2.2 Concaténation virtuelle (VCAT)

Une trame SONET est composée d'une charge utile et de deux en-têtes *Path overhead* et *Section/Line overhead*.

Les trames de capacité *STS-n* sont construites soit par concaténation fixe, soit par concaténation contiguë de plusieurs autres trames de capacité plus petite en respectant la hiérarchie SONET (figure 2.15).

La figure 2.17 illustre les mécanismes de concaténation pour la construction d'une trame *STS-3* à partir de trois trames *STS-1* [23]

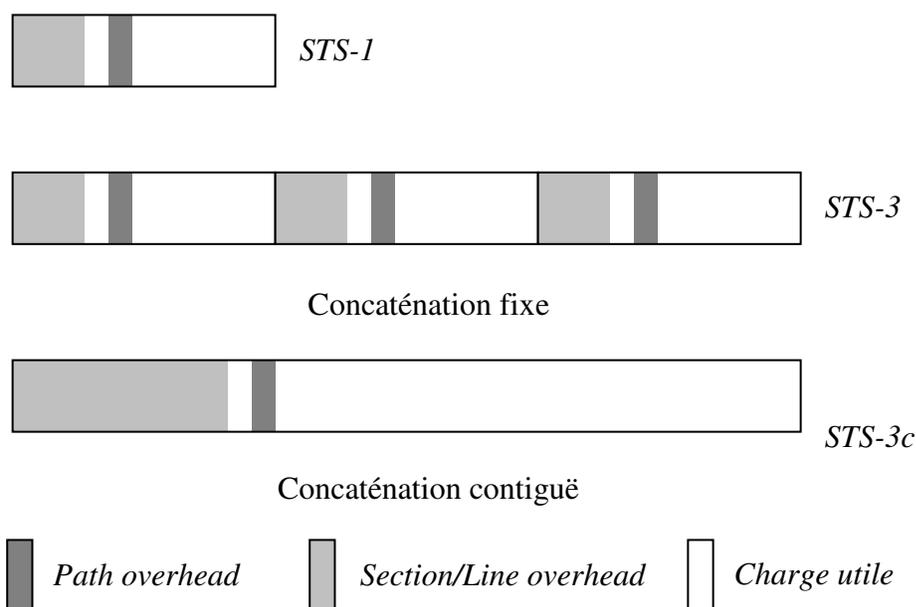


Figure 2.17 : Concaténation fixe et concaténation contiguë [23]

Selon la hiérarchie SONET, il est impossible d'obtenir toutes les concaténations contiguës possibles de capacités *STS-1*. Par exemple, la capacité *STS-24c* qui correspond à 24 fois le débit de la capacité *STS-1*, soit 1,244 Gb/s, n'existe pas dans l'hiérarchie SONET, son transport, nécessite alors l'utilisation d'une capacité *STS-48* dont le débit est le double de celui de la capacité *STS-24*. Les concaténations contiguës possibles dans la hiérarchie SONET sont : *STS-3c*, *STS-12c*, *STS-48c* et *STS-192c*.

En plus d'occasionner de la perte de bande passante, la concaténation contiguë fragmente la bande passante. La figure 2.18 illustre bien ce problème : La trame *STS-3c* est bloquée car il n'a ya pas assez d'espace dans la trame *STS-12c* pour une concaténation contiguë. Un nouvel espace dédié à la trame *STS-3c* est donc créé ce qui fragmente la bande passante.

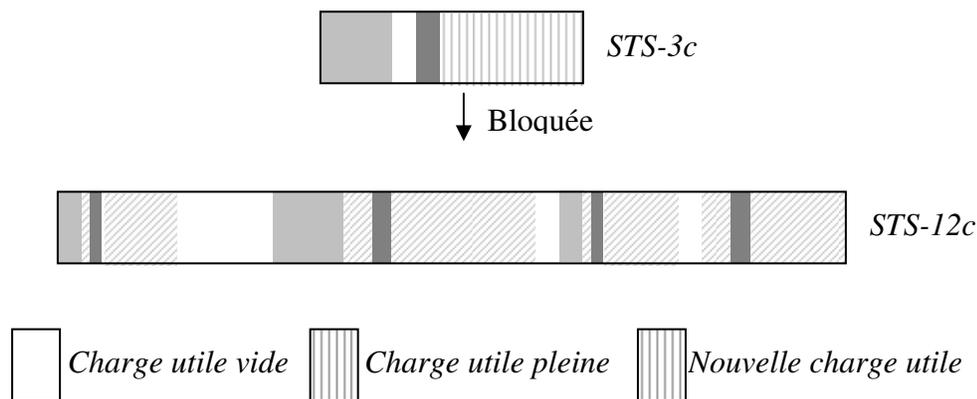


Figure 2.18 : Fragmentation de la bande passante [23]

La concaténation virtuelle VCAT a été élaborée pour remédier au problème de fragmentation de la bande passante. Elle permet l'envoi et la réception de plusieurs fragments non contigus de trames SONET, sous forme d'un seul flot. L'ensemble des fragments constitue alors un groupe de contenants virtuels VCG.

La figure 2.19 illustre l'utilisation de la concaténation virtuelle : La trame *STS-3c* n'est plus bloqué, elle occupe les espace vide la trame *STS-12c*.

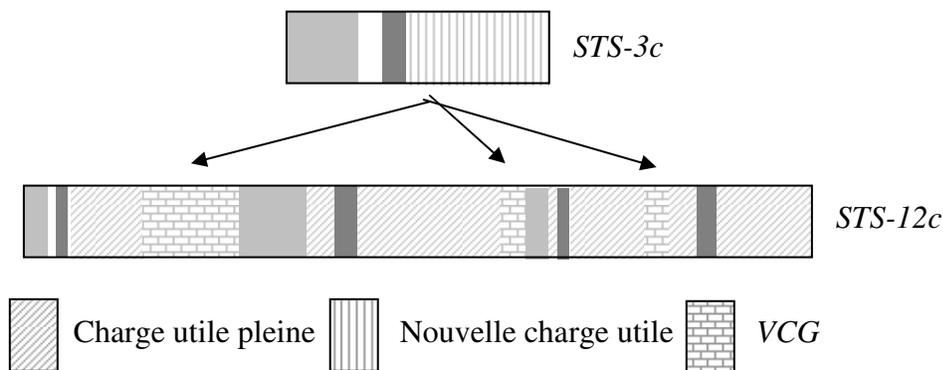


Figure 2.19 : Concaténation virtuelle [23]

Le tableau 2.4 indique le taux d'utilisation de la bande passante lorsque des signaux clients sont transportés dans des trames SONET, moyennant une concaténation virtuelle ou une concaténation contiguë [23].

La notation de VCAT pour SONET est $STS-n-mv$. Avec n , la taille des trames SONET non contiguë formant le VCG et m , le nombre de fragments $STS-n$ pour le transport du VCG.

Signaux clients	Débit	Concaténation virtuelle	Concaténation Contiguë
Ethernet	100 Mb/s	$STS-1-2v$ (100 %)	$STS 3c$ (63 %)
Gigabit Ethernet	1 Gb/s	$STS-3c-7v$ (95 %)	$STS 48c$ (42 %)
Fibre Channel	1.06 Gb/s	$STS-3c-7v$ (95 %)	$STS 48c$ (42 %)
ESCON	200 Mb/s	$STS1-4v$ (100 %)	$STS-12c$ (33 %)

Tableau 2.4 : Taux d'utilisation de la bande passante avec et sans VCAT [23]

2.4.2.3 Ajustement de capacité de liaison (LCAS)

LCAS [21] est un protocole adapté aux réseaux optiques SONET. Il permet d'ajuster à la demande la capacité des liaisons optiques. Il est implémenté en présence de VCAT, afin d'accroître et de décroître la capacité des VCG sans interrompre le trafic. Il permet aussi la suppression automatique et le remplacement dynamique des fragments de VCG inutilisés.

Le coût du déploiement de LCAS est faible, car seuls les équipements de bout en bout du réseau sont modifiés [21].

En présence des protocoles LCAS/VCAT, une demande de trafic peut être bifurquée sur plusieurs chemins optiques. La perte de bande passante est alors minimisée.

2.5 Plateforme de transport multiservice (MSPP)

La plateforme de transport multiservice MSPP supporte conjointement le protocole SDH/SONET et la technologie WDM. Elle permet le groupage de signaux de faibles débits dans des signaux WDM de haut débit. Elle est équipée de cartes clients supportant les protocoles *Fast Ethernet*, *Gigabit Ethernet*, *Fibre Channel*, *FICON* et *ESCON*. D'autres cartes

clients supportent aussi les signaux *DS-1*, *DS-3*, *OC-1*, *OC-3*, *OC-12* et *OC-48*. Les cartes de transport supportent les capacités optiques *OC-48*, *OC-192* et *OC-768*. Le groupage des signaux clients est réalisé par la carte DXC. La plateforme possède aussi d'autres cartes jouant le rôle d'amplificateur optique, de compensateur de dispersion chromatique, de multiplexeur et démultiplexeur en longueur d'onde et d'OADM.

La plateforme de transport multiservice MSPP dédouble toutes ces cartes pour ne pas interrompre la communication en cas de pannes. C'est la carte de contrôle qui est responsable de la détection de la panne, et de la redirection des signaux optiques vers les cartes opérationnelles. La figure 2.20 montre l'architecture d'une plateforme de transport multiservice MSPP

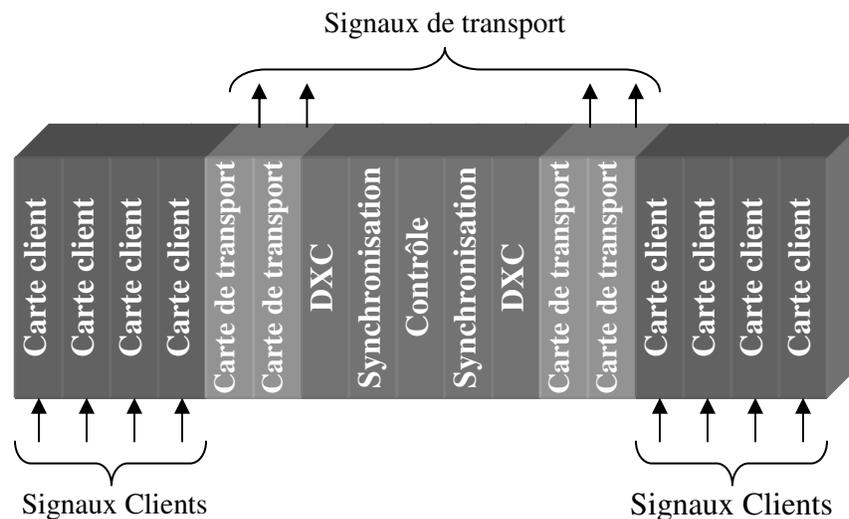


Figure 2.20 : Plateforme de transport multiservice MSPP [24]

La configuration des cartes de transport c'est ce qui définit la couche réseau du réseau optique WDM. La couche physique quand à elle est définie par l'ajout d'amplificateur de compensateurs de dispersion chromatique et de régénérateur 3R pour garantir la transmission des signaux issue des cartes de transport.

2.5.1 Caractéristiques des cartes de transport

En émission les caractéristiques d'une carte de transport sont les suivantes :

-
- La technologie de modulation : technologie de modulation utilisée par la diode laser (directe ou externe).
 - La gamme de puissance d'émission [P_{Min}^{out} , P_{Max}^{out}] en dBm.
 - La longueur d'onde nominale λ_{nom} : 1550 nm pour les réseaux de longue portée
 - Le débit: OC-48 ~ 2.5 Gb/s, OC-192 ~ 10 Gb/s , OC-768 ~ 40 Gb/s.
 - Le rapport signal sur bruit optique OSNR.

En réception les caractéristiques d'une carte de transport sont les suivantes :

- Le taux d'erreurs binaires maximal toléré BER_{Max} : Il est typiquement de 10^{-12} .
- Le rapport signal sur bruit optique minimal toléré : $OSNR_{Min}$.
- La sensibilité S dBm : elle dépend fortement du taux d'erreurs binaires.
- La gamme de puissance en réception [P_{Min}^{in} , P_{Max}^{in}] en dBm : elle dépend du taux d'erreurs binaires et de la sensibilité.
- La dispersion chromatique maximale tolérée D_{MAX} en ps/nm.km.
- Le débit: OC-48 ~ 2.5 Gb/s, OC-192 ~ 10 Gb/s , OC-768 ~ 40 Gb/s.

2.5.2 Caractéristiques de l'amplificateur optique

L'amplificateur optique présente l'inconvénient d'introduire du bruit dans le signal optique lorsque celui-ci le traverse. Le niveau de bruit est mesuré à l'aide du rapport signal sur bruit optique OSNR. Il correspond au rapport de la puissance du signal optique S et de la puissance du bruit N . Le niveau de l'OSNR doit être maintenu assez élevé pour que le signal optique arrive à destination avec un bon taux d'erreurs binaires.

$$OSNR = \frac{S}{N}$$

Dépendamment de la position de l'amplificateur dans le réseau optique, on distingue trois types d'amplification:

- L'amplification de puissance : L'amplificateur a une grande puissance de saturation. Il est installé directement en aval des émetteurs optiques.

-
- L'amplification en ligne : Il s'agit d'installer sur la fibre optique des amplificateurs à distances égales.
 - La pré-amplification : L'amplificateur est installé immédiatement en amont du récepteur pour améliorer sa sensibilité.

Selon le standard de l'ITU-T [12] les caractéristiques de l'amplificateur optique sont :

- La gamme de puissance en entrée [$P_{Min}^{in}, P_{Max}^{in}$] en dBm.
- La gamme de puissance en sortie [$P_{Min}^{out}, P_{Max}^{out}$] en dBm.
- La gamme de gain [G_{Min}, G_{Max}] en dB.
- Le facteur de bruit spontané NF.

Le facteur de bruit spontané NF d'un amplificateur est défini comme étant le rapport de l'OSNR du signal à l'entrée de l'amplificateur $OSNR_{in}$ et de l'OSNR à sa sortie $OSNR_{out}$. La valeur typique du NF pour un amplificateur EDFA est de 4 [10].

$$NF = \frac{OSNR_{in}}{OSNR_{out}} = \frac{\left(\frac{S}{N}\right)_{in}}{\left(\frac{S}{N}\right)_{out}}$$

2.5.3 Caractéristiques du compensateur de dispersion chromatique

Le compensateur de dispersion chromatique DCU est caractérisé par son coefficient de dispersion chromatique et par sa perte d'insertion. La valeur typique du coefficient de dispersion chromatique est de -1360 ps/nm [2], celle de la perte d'insertion est de 9 dB [2].

Dépendamment de la position du DCU dans le réseau optique, on distingue trois types de compensation :

- La pré-compensation : le DCU est installé directement en aval de l'émetteur optique. Il permet de baisser le niveau de dispersion chromatique accumulée dans le signal optique avant son envoi.

-
- La compensation en ligne : le DCU est installé entre deux sections successives de fibre optique.
 - La post-compensation : le DCU est installé immédiatement en amont du récepteur. Il permet de baisser le niveau de dispersion chromatique accumulée dans le signal optique avant sa démodulation.

Les caractéristiques du compensateur de dispersion chromatique sont :

- Le coefficient de dispersion chromatique pour une longueur d'onde λ donnée D_λ en ps/nm
- La perte d'insertion P^{DCU}_{Loss} en dB.

2.5.4 Caractéristiques du multiplexeur et démultiplexeur en longueur d'onde

Les principales caractéristiques du multiplexeur et démultiplexeur en longueur d'onde sont :

- La puissance maximale en entrée du multiplexeur P^{in}_{Max} en dBm.
- Le nombre de ports $NbrPorts$
- La perte d'insertion du multiplexeur P^M_{Loss} en dB.
- La perte d'insertion du démultiplexeur P^D_{Loss} en dB

2.5.5 Caractéristiques de l'OADM

Les principales caractéristiques de l'OADM sont :

- Puissance maximale en entrée P^{in}_{Max} en dBm,
- Nombre de ports en ajout (Add) $NbrPortsAdd$
- Nombre de ports en extraction (Drop) $NbrPortsDrop$
- Perte d'insertion lors d'un ajout d'une longueur d'onde P^{Add}_{Loss} en dB
- Perte d'insertion lors de l'extraction d'une longueur d'onde P^{Drop}_{Loss} en dB

2.6 Classification des réseaux optiques WDM

Dépendamment de sa portée, un réseau optique WDM peut être :

- **Régional**: sa portée est alors de plusieurs milliers de kilomètres et sa topologie est souvent maillée (figure 2.21). Les signaux optiques transportés par ce type de réseau ont un débit qui varie entre 2.5 et 40 Gb/s.
- **Métropolitain** : sa portée est de quelques centaines de kilomètres. Sa topologie est généralement en anneau, mais la tendance actuelle privilégie la topologie maillée à cause de sa flexibilité et sa robustesse (figure 2.21). Les signaux optiques transportés par ce type de réseau ont un débit qui varie entre 2.5 et 10 Gb/s.
- **D'accès** : sa portée est de quelques dizaines de kilomètres. Sa topologie dépend de la technologie PON utilisée (figure 2.21). Le débit des signaux optiques transportés par ce type de réseau peut atteindre 1Gb/s.

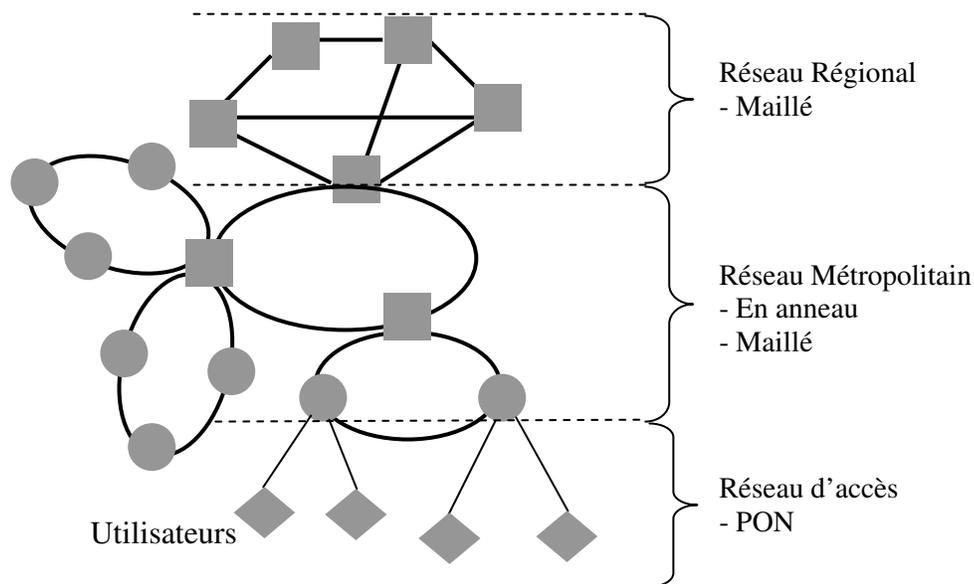


Figure 2.21 : Classification des réseaux optiques WDM [25]

2.7 Métaheuristique Tabou

La métaheuristique Tabou a été développée indépendamment par Glover [26] [27]. Elle fait appel à un ensemble de mécanismes pour guider la recherche de solution optimale de manière

intelligente à travers l'espace des solutions. Elle examine le voisinage de la solution courante S et retient la meilleure solution S' , même si celle-ci demeure moins intéressante que S . La recherche Tabou ne s'arrête donc pas au premier optimum trouvé. Cette stratégie peut entraîner des cycles, par exemple un cycle de longueur 2 : $S-S'-S-S'...$ Pour éviter ce type de cycle, on mémorise les k dernières solutions dans une mémoire à court terme puis on interdit tout mouvement qui conduit à ces solutions. Cette mémoire est appelée liste Tabou, une des composantes essentielles de cette méthode. Elle permet d'éviter tous les cycles de longueur inférieure ou égale à k . La valeur de k dépend du problème à résoudre et peut éventuellement évoluer au cours de la recherche.

Certains mouvements enregistrés dans la liste Tabou peuvent être intéressants à exécuter même s'ils violent certaines contraintes. Un mécanisme particulier, appelé l'aspiration, est mis en place afin de résoudre ce problème. Ce mécanisme permet de lever le statut Tabou d'un mouvement pour introduire un risque de cycle dans le processus de recherche. La fonction d'aspiration peut être définie de plusieurs manières. La fonction la plus simple consiste à révoquer le statut Tabou d'un mouvement si ce dernier permet d'atteindre une solution de meilleure qualité que la solution courante.

Il existe d'autres techniques pour améliorer la précision de la méthode Tabou, notamment, l'intensification et la diversification.

L'intensification se fonde sur l'idée d'apprentissage de propriétés favorables : les propriétés communes souvent rencontrées dans les meilleurs mouvements effectués sont mémorisées au cours de la recherche, puis favorisées pendant la période d'intensification. Une autre manière d'appliquer l'intensification consiste à mémoriser une liste de solutions de bonnes qualités et à retourner vers une de ces solutions.

La diversification cherche à diriger la recherche vers des zones inexplorées. Sa mise en œuvre consiste à modifier temporairement la fonction de coût pour soit favoriser des mouvements n'ayant pas été effectués, soit pénaliser les mouvements ayant été souvent répétés.

La figure 2.22 montre l'organigramme de la métaheuristique Tabou où f est la fonction objectif, S_0 la solution initiale, S^* la solution courante, $N(S^*)$ le voisinage de la solution courante S^* , S' la solution issue du voisinage $N(S^*)$ et f^* l'évaluation de la solution optimale.

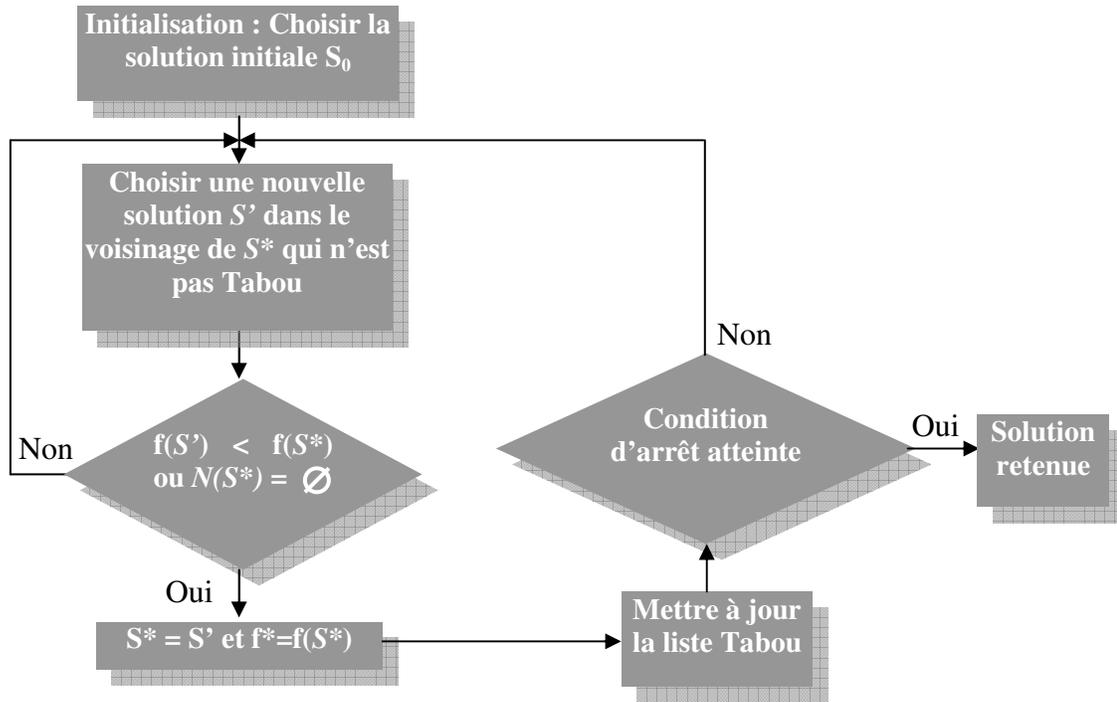


Figure 2.22 : Organigramme de la métaheuristique Tabou

Une des propriétés intéressantes de la recherche Tabou est qu'elle permet d'explorer des espaces de solutions non convexes, en relâchant certaines contraintes. La fonction objectif traverse alors le domaine irréalizable pour atteindre l'autre côté du domaine réalisable (figure 2.23).

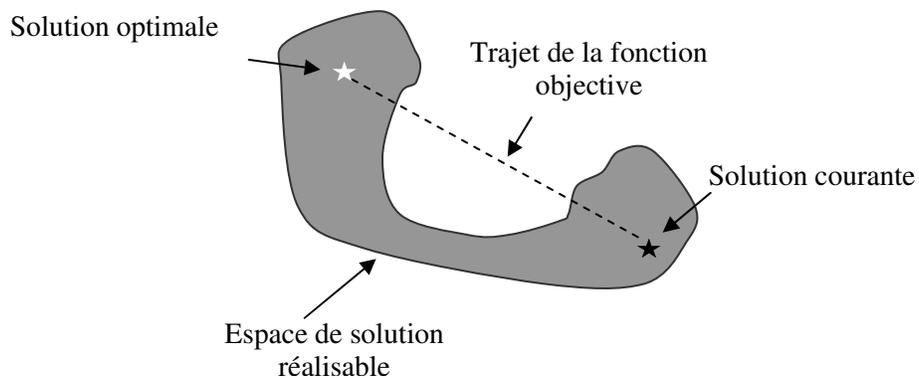


Figure 2.23 : Exploration d'un espace de solutions non convexe

Comme pour la plupart des métaheuristiques, il n'existe pas de résultats théoriques garantissant la convergence d'une heuristique Tabou vers un optimum global. La raison principale de cet état de fait est due à la nature adaptative et modulable même de la méthode. Son analyse par des outils mathématiques est alors difficile.

La méthode Tabou suscite un intérêt toujours croissant depuis sa découverte. De nombreux raffinements ont été introduits dans la méthode afin d'améliorer son efficacité [28][29][30][31][32]. Elle a aussi été utilisée dans la résolution de nombreux problèmes d'optimisation et les résultats pratiques obtenus étaient très encourageants.

2.8 Problème GRWA

Le problème de groupage, de routage et d'affectation de longueur d'onde, GRWA (*Grooming, Routing and Wavelength Assignment*) peut être formulé comme suit [34] :

Étant donné une demande de trafic en terme de requêtes de bande passante entre des nœuds sources et des nœuds destination, une topologie de réseau optique dans laquelle chaque lien est une fibre optique pouvant transporter un certain nombre de longueurs d'ondes de capacité donnée, et dans laquelle chaque nœud est un équipement ayant un certain nombre de ports d'entrée et de sortie. La résolution du problème GRWA consiste à trouver l'ensemble des chemins optiques pour satisfaire la demande de trafic tout en optimisant les ressources du réseau. Un chemin optique entre un nœud source et un nœud destination est défini par sa longueur d'onde, son débit et l'ensemble des fibres optiques qu'il traverse [35].

La résolution du problème GRWA peut se faire dans le cas d'une demande de trafic statique, évolutive ou dynamique et selon un scénario bloquant ou non bloquant [4].

La demande de trafic est statique lorsqu'elle est entièrement connue avant la résolution du problème GRWA et qu'elle ne change pas pendant l'exécution de l'heuristique. Elle est évolutive lorsqu'elle est entièrement connue avant la résolution du problème GRWA et qu'elle évolue pendant l'exécution de l'heuristique. Elle est dite dynamique lorsque les requêtes arrivent une après l'autre pendant le processus de résolution.

Un scénario est bloquant, lorsque les ressources du réseau ne sont pas suffisantes pour satisfaire la demande de trafic. Dans le cas contraire, le scénario est non-bloquant.

Dépendamment du type de la demande de trafic et du scénario, la résolution du problème GRWA peut avoir différentes fonctions objectifs. Par exemple dans le cas d'un scénario bloquant et dans un contexte de trafic dynamique, la fonction objectif peut avoir comme but de minimiser la probabilité de blocage des futures requêtes [36][37].

2.8.1 Approches de résolution du problème GRWA

Le problème GRWA peut être résolu selon deux approches. Il est soit subdivisé en sous-problème complémentaires, soit résolu au complet.

Un exemple de subdivision du problème GRWA est de séparer le groupage du routage et de l'affectation de longueurs d'ondes RWA (*Routing and Wavelength Assignment*) [4] ou de séparer le groupage et le routage GR (*Grooming and Routing*) de l'affectation de longueurs d'ondes WA (*Wavelength Assignment*) [38]. L'inconvénient de cette approche, c'est que l'union de solutions optimales des deux sous-problèmes ne constitue pas nécessairement la solution optimale du problème au complet.

L'approche de résolution du problème GRWA au complet [38][39][40] est plus complexe à réaliser, mais sa solution est meilleure car le couplage entre les sous-problèmes est conservé.

La résolution du problème GRWA dépend des contraintes considérées et de la fonction objectif que l'on optimise.

Dans le cadre d'un réseau optique SONET TDM en anneau, le coût est calculé en fonction du nombre de SADM (*SONET Add Drop Multiplexer*) présents dans le réseau. La fonction objectif du problème GRWA est de minimiser le nombre de SADM [41]. D'autres heuristiques ont été élaborées dans le but de réduire à la fois le nombre de longueurs d'ondes et le nombre de SADM [42].

L'étude réalisée dans [43] a pour objectif de réduire le coût de six réseaux WDM en anneau en réduisant le nombre d'OADM. Le coût de chacun des réseaux est calculé pour différentes

distributions statistiques de demande de trafic dynamique. Les auteurs de [44] proposent une formulation mathématique en nombre entier du problème GRWA. Ils comparent ensuite les performances des solutions trouvées selon que les chemins optiques font un seul ou plusieurs sauts optiques. L'étude menée dans [45] propose une heuristique pour la résolution du problème GRWA dans le cas de deux réseaux optiques WDM en anneau interconnectés.

Dans le cadre d'un réseau optique maillé, les auteurs de [34] proposent des architectures de nœud adaptées à la résolution du problème GRWA. Ils proposent aussi une formulation mathématique du problème et comparent sa solution avec celles de deux heuristiques. L'étude menée dans [46] propose une formulation mathématique en nombre entier du problème GRWA suivi d'une heuristique pour minimiser le nombre de ports. L'étude dans [47] considère le cas où le trafic est dynamique, elle compare deux stratégies pour grouper et router efficacement le trafic de faible débit.

L'étude présentée dans [6] résout le problème GRWA au complet en utilisant la métaheuristique Tabou. La demande de trafic considérée est asymétrique, statique et de différentes granularités. Le réseau est constitué de nœuds équipés de plateforme de transport multiservice MSPP. Une heuristique appelée GRWABOU a été développée dans le but de satisfaire la demande de trafic et de minimiser le nombre de cartes de transport installées dans chaque nœuds du réseau.

2.8.2 Stratégies de routage

Le routage dans les réseaux optiques WDM [4] peut être fixe (*Fixed Routing*), alternatif fixe (*Fixed-Alternate Routing*) ou adaptatif (*Adaptative Routing*).

- Le routage fixe : affecte une route permanente pour chaque paire de nœuds source et destination. Cette même route est choisie chaque fois qu'une requête est routée entre la même paire de nœuds.
- Le routage alternatif fixe [48] : à la place d'affecter une seule route fixe pour chaque paire de nœuds source et destination, chaque nœud maintient une table de routage qui contient une liste ordonnée de routes fixes menant à chacun des nœuds destination. Ces routes peuvent être la plus courte, la deuxième plus courte, la troisième plus courte etc. Lorsqu'un

nœud source reçoit une demande de connexion, il tente d'établir de manière séquentielle une connexion à travers chacune des différentes routes de sa table de routage, jusqu'à ce qu'une route valide soit trouvée. Si aucune route n'a été trouvée, la demande de connexion est alors bloquée.

- Le routage adaptatif [49]: avec ce type de routage, la route entre un nœud source et un nœud destination est choisie dynamiquement selon l'état courant du réseau optique. Ce type de routage présente moins de probabilité de blocage que les stratégies de routage précédentes, mais il demande plus de temps de calcul.

Les heuristiques présentées dans le cadre de cette thèse utilisent la stratégie de routage adaptatif.

2.8.3 Stratégies d'affectation de longueurs d'ondes

Une fois qu'une route est déterminée pour une demande de connexion donnée, il faut lui affecter une longueur d'onde. Seulement, il ne faut pas qu'une même longueur d'onde soit affectée à deux chemins optiques qui partagent la même fibre optique. Une des approches de résolution de ce problème est la coloration de graphe [50].

Plusieurs heuristiques utilisant différentes stratégies d'affectation sont proposées dans [4]. Parmi ces heuristiques, il y a l'affectation de longueurs d'ondes aléatoire (*Random Wavelength Assignment*), la première longueur d'onde disponible (*First-Fit*), la longueur d'onde la moins utilisée (*Least Used*), la longueur d'onde la plus utilisée (*Most Used*), la réservation de longueur d'onde (*Wavelength Reservation*) et la protection du seuil limite (*Protecting Threshold*).

- Affectation de longueurs d'ondes aléatoire : une longueur d'onde parmi celles disponibles, est sélectionnée aléatoirement
- Première longueur d'onde disponible : les longueurs d'ondes sont numérotées, et la longueur d'onde parmi celles qui sont disponibles qui a le plus petit numéro est sélectionnée.
- Longueur d'onde la moins utilisée : c'est la longueur d'onde qui est affectée au plus petit nombre de liens dans le réseau optique qui est sélectionnée parmi celles disponibles.

-
- Longueur d’onde la plus utilisée : c’est la longueur d’onde qui est affectée au plus grand nombre de liens dans le réseau optique qui est sélectionnée parmi celles disponibles.
 - Réserve de longueur d’onde : une longueur d’onde est réservée pour un lien et une connexion donnés. Par exemple si la longueur d’onde λ_i est affectée au lien (i,j) et si elle est réservée pour une connexion entre les noeuds $i-1$ et $j+1$ seulement. Alors une demande de connexion du noeud i vers le noeud j ne peut pas être établie avec la longueur d’onde λ_i sur le lien (i,j) , même si celle-ci est disponible. Cette stratégie d’affectation présente l’avantage de réduire la probabilité de blocage dans le cas où le trafic passe par plusieurs chemins optiques (*multi-hop Traffic*).
 - Protection du seuil limite : une requête de demande de trafic qui traverse un seul chemin optique se voit assigner une longueur d’onde seulement si le nombre de longueurs d’ondes disponibles pour un lien est plus petit ou égal à une valeur limite.

Les heuristiques présentées dans le cadre de cette thèse utilisent la stratégie d’affectation de la première longueur d’onde disponible.

2.9 Optimisation multicouches

La solution du problème GRWA sert à concevoir la couche réseau du réseau optique. Des travaux récemment réalisés tentent de concevoir cette couche, en tenant compte de certaines contraintes liées à la couche physique. Les algorithmes d’optimisation développés sont alors qualifiés de multicouches. Une étude de synthèse réalisé dans [51] liste les contraintes de la couche physique et leurs impacts sur la conception des réseaux optiques WDM. Elle présente aussi l’état de l’art des algorithmes multicouches de résolution du problème GRWA ainsi qu’une classification des algorithmes selon le type du problème GRWA (statique ou dynamique), les contraintes de la couche physique considérés, le critère de réalisabilité et la manière dont les contraintes physique sont collectés (centralisé ou distribué). L’étude dans [52] classe les algorithmes multicouches selon l’étape où la validation des contraintes de la couche physique est réalisée. Certains algorithmes valident les contraintes après l’étape du routage, d’autres les évaluent à chaque affectation de longueurs d’ondes ou encore pour chaque chemin optique.

Les heuristiques présentées dans le cadre de cette thèse évaluent les contraintes physiques pour chaque longueur d'onde et pour chaque lien du chemin optique.

Dans [53], les auteurs proposent un algorithme *ICBR (Impairment Constraint-Based Routing)* pour la résolution du problème *RWA (Routing and Wavelength Assignment)* dans le cas d'un petit réseau métropolitain en tenant compte à chaque fois de l'une des contraintes suivantes : la dispersion chromatique, la dispersion modale de polarisation PMD, la diaphonie, le bruit et l'effet de la concaténation de filtres optiques. Les résultats de cette étude démontrent la relation étroite qui existe entre ces contraintes et la probabilité de blocage.

Les auteurs de [54] considèrent le routage en tenant compte des contraintes de bruit et de diaphonie. Le choix d'un chemin optique est basé sur l'estimation du taux d'erreurs binaires BER. Une étude réalisée dans [55] propose un algorithme *ICBR* dynamique pour les réseaux optiques transparents. Elle tient compte de l'atténuation, du bruit d'amplification accumulé et de la saturation du gain des amplificateurs. La métrique utilisée par l'algorithme d'optimisation est le facteur de bruit NF. Les résultats obtenus sont aussi évalués en termes de probabilité de blocage. L'article [56] propose un algorithme *ICBR* basé sur la programmation en nombre entier, suivi d'une heuristique pour la résolution du problème *GRWA*. Les auteurs de [57] tentent de résoudre le problème *RWA* dans le cas d'un réseau maillé en tenant compte du bruit et de la dispersion modale de polarisation PMD. Les articles [58] et [59] proposent une solution au problème *RWA* en tenant compte respectivement de la diaphonie, du bruit par le biais du facteur Q lié au rapport signal sur bruit optique OSNR. Dans le cas de l'article [60], le bruit est évalué par l'OSNR. Les auteurs de [61] résolvent le problème *GRWA* tout en optimisant l'emplacement des amplificateurs optiques dans le réseau WDM, ils considèrent le cas où l'atténuation de la fibre optique n'est pas la même pour toutes les longueurs d'ondes.

Chapitre 3 : Conception des heuristiques multicouches de résolution du problème GRWA

Dans ce chapitre nous définissons les concepts clés pour l'élaboration de deux heuristiques multicouches de résolution du problème GRWA. Nous commençons par énoncer la stratégie multicouche de conception des réseaux optiques. Ensuite, nous décrivons les modèles de représentation de la topologie d'un réseau optique WDM et de sa demande de trafic. Nous présentons ensuite la terminologie du problème GRWA et proposons une formulation en nombre entier du problème GRWA ainsi que les hypothèses pour sa résolution. Nous présentons les éléments de conception de chacune des couches réseaux et physiques. Finalement nous présentons le schéma global des deux heuristiques Tabou multicouches d'optimisation des réseaux optiques WDM développées. La première optimise la couche réseau du réseau optique pour ensuite construire sa couche physique alors que la seconde construit et optimise simultanément les deux couches.

3.1 Stratégie multicouche de conception des réseaux optiques WDM

La conception des réseaux optiques WDM suit actuellement le processus d'optimisation multicouche séquentielle de la figure 3.1. Celle-ci se fait en deux étapes distinctes. La première consiste à concevoir la couche réseau du réseau optique par le biais de la résolution du problème GRWA. La deuxième permet l'élaboration de la couche physique formée par les équipements optiques et optoélectroniques nécessaires pour le transport des signaux optiques. Ces équipements sont ajoutés aux nœuds et aux liens du réseau optique pour compenser les effets linéaires inhérents à la transmission du signal optique.

Le coût du réseau est calculé en fonction de la quantité d'équipements installés sur le réseau. Ce processus de conception trouve malheureusement ses limites lorsqu'il s'agit d'optimiser le coût du réseau optique.

Le processus de la figure 3.2 permet la conception de réseau optique en optimisant simultanément ses couches réseau et physique. Il s'agit donc de résoudre le problème GRWA en tenant compte à la fois des contraintes de la couche réseau et de certaines contraintes de la couche physique. Le respect de ces contraintes se traduit par l'ajout d'équipements au moment de la conception de la couche réseau. Il est donc possible d'optimiser le coût du réseau en choisissant pour chaque requête de demande de trafic, le chemin optique le moins coûteux.

Les heuristiques d'optimisation multicouches développées dans le cadre de ce projet de recherche suivent les deux processus de conception des réseaux optiques WDM des figures 3.1 et 3.2.

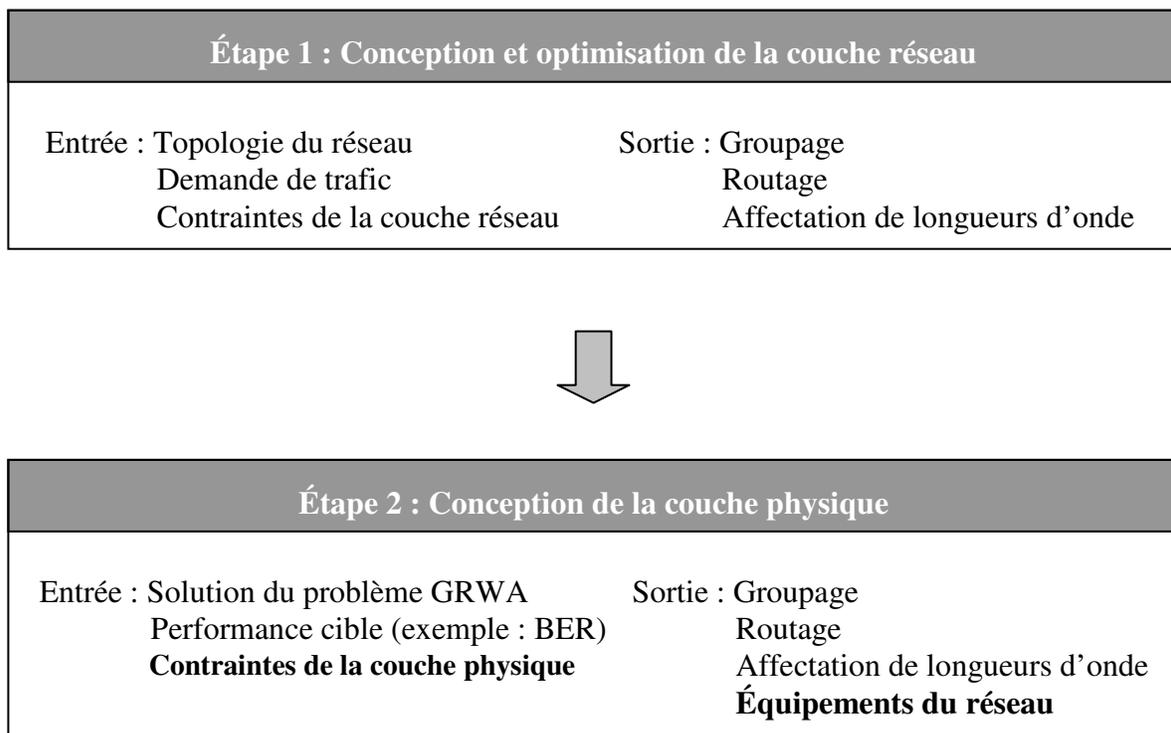


Figure 3.1 : Processus d'optimisation multicouche séquentielle des réseaux optiques WDM

Conception et optimisation simultanée des couches réseau et physique

Entrée : Topologie du réseau Demande de trafic Contraintes de la couche réseau Contraintes de la couche physique Performance cible (exemple : <i>BER</i>)	Sortie : Groupage Routage Affectation de longueurs d'onde Équipements du réseau
---	---

Figure 3.2 : Processus d'optimisation multicouche simultanée des réseaux optiques WDM

3.2 Modélisation du réseau optique WDM

Un réseau optique WDM est représenté par un graphe orienté, composé d'un ensemble de nœuds $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ et d'un ensemble d'arcs $E = \{e_1, e_2, \dots, e_m\}$ (figure 3.3). Les nœuds du graphe correspondent aux nœuds du réseau et les arcs correspondent aux liens de fibres optiques unidirectionnels qui relient les nœuds. Toutes les fibres optiques peuvent transporter un nombre maximal de longueurs d'ondes noté W .

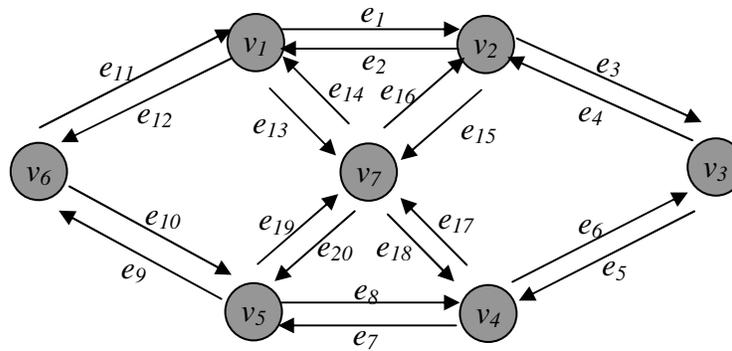


Figure 3.3 : Modélisation du réseau optique WDM

Chacun des nœuds est constitué d'une plateforme multiservice de transport MSPP intégrant un multiplexeur en amont et un démultiplexeur en aval (MUX/DEMUX) pour chacune des fibres optiques entrante et sortante (figure 3.4). Un OADM est utilisé lorsqu'une partie des longueurs d'ondes est ajoutée ou extraite des fibres optiques (figure 3.5).

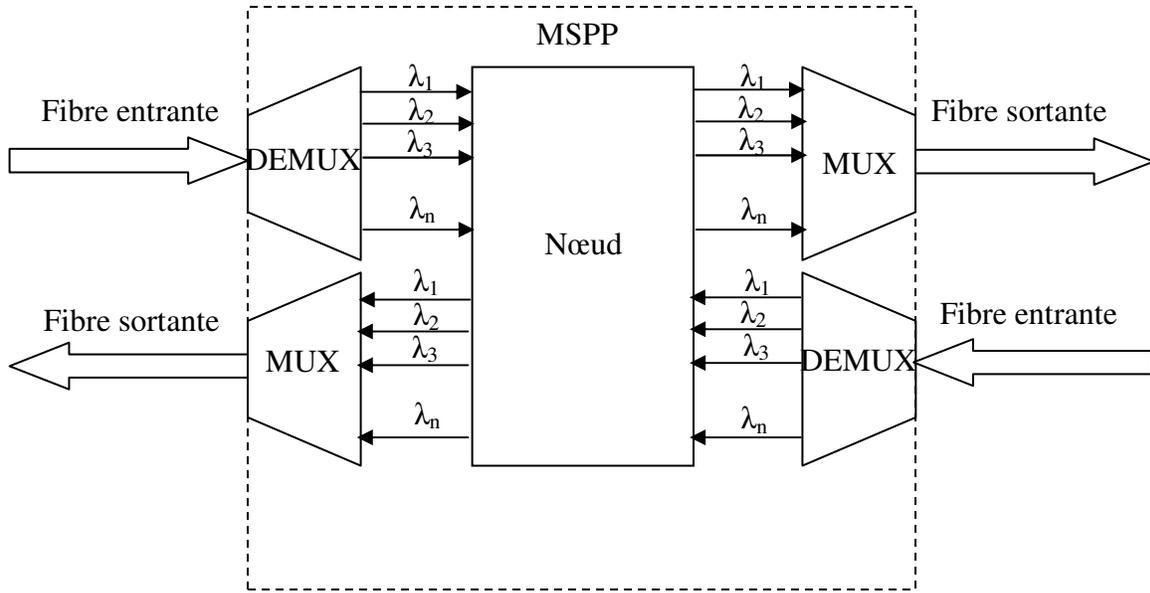


Figure 3.4 : MSPP avec MUX/DEMUX

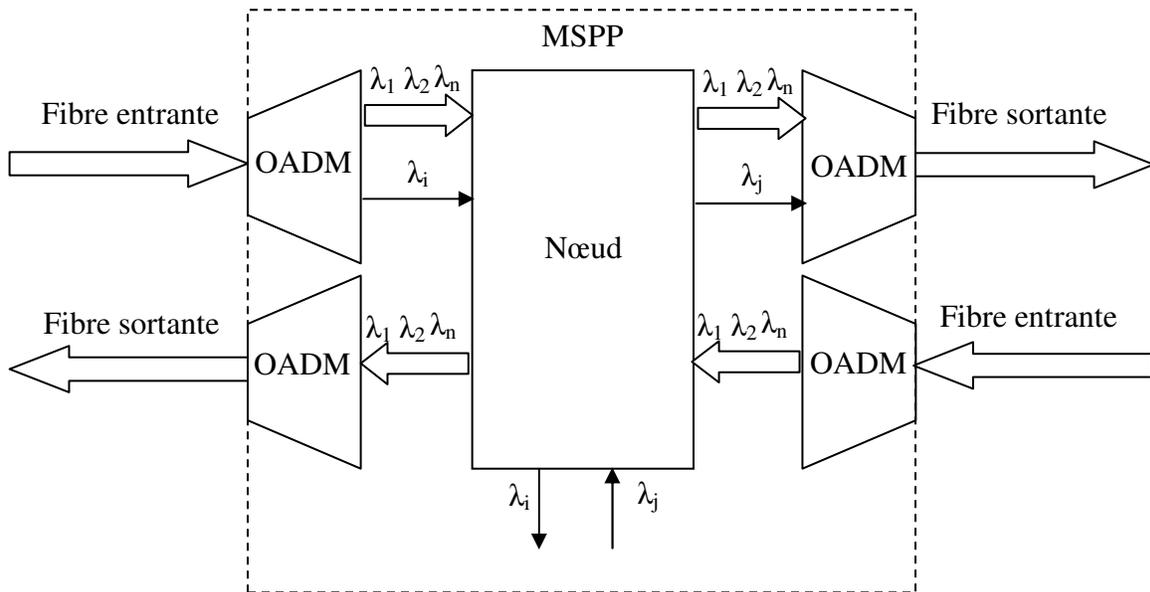


Figure 3.5 : MSPP avec OADM

3.3 Modélisation de la demande de trafic

Le trafic est modélisé par un ensemble de matrices T de différents débits. Chaque élément $R_{s,d}^t$ d'une matrice t appartenant à T , est une requête qui requiert un nombre entier de capacité de

débit t du nœud source v_s au nœud destination v_d . L'ensemble du trafic est groupé sous forme d'une seule matrice K , appelée matrice de demande de trafic. Chaque élément $k_{s,d}$ de la matrice K représente le débit total entre un nœud source v_s et un nœud destination v_d .

$$k_{s,d} = \sum_{t \in T} R_{s,d}^t \times t$$

Le tableau 3.1 indique les débits supportés par les heuristiques développées.

Capacité optique	Débit en bit/s
OC-1	51,7 Mb/s
OC-3	155 Mb/s
OC-12	622 Mb/s
OC-48	2,5 Gb/s

Tableau 3.1 : Les débits supportés par les heuristiques développées

3.4 Terminologie pour la résolution du problème GRWA

Voici une liste par ordre alphabétique des principaux termes utilisés dans la résolution du problème GRWA [8].

- Capacité de transport : Elle correspond au débit utilisé par l'équipement électronique. Dans le cas des cartes de transports il s'agit des capacités OC-48 et OC-192.
- Chemin : Il s'agit d'un ensemble de liens consécutifs sans boucle qui relie un nœud source à un nœud destination.
- Chemin physique : Il s'agit d'un chemin auquel est associée une longueur d'onde.
- Demande de trafic : La demande de trafic k_{sd} possède une source (v_s), une destination (v_d) ainsi qu'un débit demandé. Le débit demandé correspond à la somme de toutes les requêtes qui partagent la même source et la même destination.
- Flot : Il s'agit d'un chemin physique auquel est associé un débit. Chaque demande de trafic est séparée en un ensemble de flots qui partagent tous la même source et la même

destination et dont la somme des débits doit être égale au débit de la demande de trafic qui relie cette source à cette destination.

- Interruption : Une interruption survient sur un flot, à un nœud particulier. Plus précisément, cela signifie que le signal optique d'un flot est interrompu à un nœud intermédiaire du chemin en passant par une carte de transport. Le signal est converti du domaine optique vers le domaine électrique, pour ensuite être reconverti du domaine électrique vers le domaine optique.
- Requête : il s'agit en fait d'une requête élémentaire inscrite dans les matrices de trafic. Une requête doit avoir un nœud source (v_s) et un nœud destination (v_d). Le débit de cette requête est $OC-t$ où $t \in T$ et où $T = \{1, 3, 12, 24, 48\}$ selon la hiérarchie SONET. Il peut bien sûr y avoir plusieurs requêtes qui vont de la même source à la même destination.
- Saut optique : Il s'agit d'une partie d'un flot qui débute à un port de sortie d'une carte de transport MSPP et qui se termine à un port d'entrée d'une autre carte de transport MSPP sans subir d'interruptions. Un flot possède, au minimum, un saut optique si le signal du flot n'est jamais interrompu. Un flot possède toujours exactement un saut optique de plus que le nombre d'interruptions. Par exemple, si un flot transportant un débit OC-48 du nœud source A au nœud destination C sur la longueur d'onde λ est interrompu au nœud B, Il donne naissance à deux sauts optiques. Le premier du nœud A au nœud B et le deuxième du nœud B au nœud C. De ce fait nous avons deux sauts optiques et une interruption, ce qui démontre le fait d'avoir toujours un saut optique de plus que le nombre d'interruptions.
- Segment : Il s'agit d'un chemin optique qui débute à un port de sortie d'une carte de transport MSPP et qui se termine à un port d'entrée plus loin sur une carte d'un autre nœud en restant toujours dans le domaine optique ; c'est-à-dire sans passer par d'autres cartes de transport au cours du chemin. Il s'agit en fait d'un saut optique sauf qu'il n'est pas associé à un flot particulier : plusieurs flots peuvent partager le même segment.
- Solution : Une solution est entièrement définie par un routage, un groupage et une affectation de longueurs d'ondes où toutes les requêtes sont satisfaites.
- Solution réalisable : Une solution est réalisable si elle satisfait la demande de trafic et respecte les contraintes de la couche réseau.
- Solution réalisable physiquement : Une solution est réalisable physiquement si elle réalisable et respecte les contraintes de la couche physique.

3.5 Formulation du problème GRWA

Considérons une demande de trafic en terme de requêtes de bande passante entre des nœuds sources et des nœuds destination et une topologie de réseau optique dans laquelle chaque lien est une fibre optique pouvant transporter un certain nombre de longueurs d'ondes de capacité donnée, et dans laquelle chaque nœud est un équipement ayant un certain nombre de ports d'entrée et de sortie. La résolution du problème GRWA consiste à trouver l'ensemble des chemins optiques pour satisfaire la demande de trafic tout en optimisant les ressources du réseau.

Il peut aussi être formulé comme un problème d'allocation de ressources de réseau avec capacité et flots bifurqués. Dans sa forme générale, ce problème correspond à installer un ensemble de ressources sur le réseau dont la capacité permet de satisfaire un ensemble de requêtes tout en minimisant les coûts d'installation et de routage.

Soit $G = (V; E)$ un graphe représentant le réseau optique. Soit E l'ensemble des arcs du graphe G . Soit K l'ensemble des requêtes $k \in K$ définies par le triplet (s_k, d_k, t_k) correspondant à leur nœud source, leur nœud destination et leur demande en bande passante.

Étant donné U_{ij} la capacité associée à l'installation d'une unité de ressource, pouvant être installée (plusieurs fois), sur l'arc $(i; j) \in E$; c_{ij} correspond au coût d'installation d'une unité de ressource sur l'arc $(i; j)$ et r_{ij}^k correspond au coût de routage d'une unité de flot k sur l'arc $(i; j) \in E$. Pour modéliser ce problème en programmation linéaire en nombre entier, on utilise les variables suivantes:

$x_{ij}^k = 1$ si la requête $k \in K$ utilise l'arc $(i; j)$, 0 sinon.

y_{ij} = le nombre d'unités de ressources installées sur l'arc (i, j)

La formulation du problème GRWA est donnée par:

$$\min \sum_{(i,j) \in E} \sum_{k \in K} t_k r_{ij}^k x_{ij}^k + \sum_{(i,j) \in E} c_{ij} y_{ij} \quad (1)$$

$$\sum_{j \in N: (i,j) \in E} x_{ij}^k - \sum_{j \in N: (j,i) \in E} x_{ji}^k = \begin{cases} 1 & \text{si } i = S_k \\ -1 & \text{si } i = d_k \quad i \in V \quad k \in K \\ 0, & \text{sinon} \end{cases} \quad (2)$$

$$\sum_{k \in K} t^k x_{ij}^k \leq U_{ij} y_{ij} \quad (i,j) \in E \quad (3)$$

$$x_{ij}^k \in \{0,1\} \quad (i,j) \in E, k \in K \quad (4)$$

$$y_{ij} \in \mathbb{N} \quad (i,j) \in E \quad (5)$$

L'objectif (1) minimise les coûts d'installation des capacités. Les contraintes de flot (2) définissent le chemin suivi par chaque requête. Les contraintes de capacité (3) imposent que la capacité installée sur chaque arc doit être supérieure à la capacité utilisée par les requêtes. Les contraintes d'intégralité (4) et (5) imposent que chaque requête doit être routée sur un chemin unique et que la capacité installée vient par lots de capacité.

La résolution du problème GRWA sans contraintes de la couche physique constitue la couche réseau du réseau optique.

Le problème GRWA résolu dans le cadre de ce projet de recherche a pour objectif de minimiser le coût du réseau optique tout en maximisant le taux d'utilisation de sa bande passante. Le coût du réseau est calculé en fonction du nombre de cartes de transports, du nombre de compensateurs de dispersions chromatiques, du nombre d'amplificateurs optiques et du nombre de régénérateurs 3R nécessaires pour satisfaire la demande de trafic. Le taux d'utilisation de la bande est optimisé car chaque demande de trafic peut être routée sur des chemins optiques différents en utilisant les protocoles LCAS/VCAT. Le taux d'utilisation de la bande passante correspond au ratio de la bande passante utilisée pour satisfaire la demande de trafic et la bande passante totale disponible.

3.5.1 Hypothèses et contraintes de la couche réseau

Nous avons repris les mêmes hypothèses et les mêmes contraintes de la couche réseau que l'étude décrite dans [8]:

-
- Toutes les longueurs d’ondes ont la même capacité maximale OC-192.
 - Toutes les fibres optiques ont le même nombre maximal de longueurs d’ondes W .
 - Le nombre de ports optiques disponibles est suffisant pour satisfaire la demande de trafic et les MSPPs permettent de grouper tout le trafic qui les traverse.
 - Les cartes de transports comportent deux ports, un en entrée et un en sortie.
 - Les capacités des cartes de transport sont OC-48 ou OC-192.
 - Le trafic est asymétrique et les liens sont directionnels; chaque lien correspond à deux fibres optiques de direction opposées. L’une est entrante au nœud et l’autre en est sortante.
 - Chaque requête peut être routée sur des chemins optiques différents, on parle alors de flots bifurqués.
 - La demande en bande passante des requêtes prend les valeurs standards suivantes : OC-1, OC-3, OC-12 et OC-48.

3.5.2 Hypothèses et contraintes de la couche physique

La conception de la couche physique est traduite par l’ajout de contraintes de budget de puissance, de dispersion chromatique et de bruit optique au problème GRWA.

Les hypothèses et les contraintes de la couche physique prises en comptes dans la résolution du problème GRWA sont issues des spécifications du MSPP ONS15454 SONET [24]:

- La puissance à la sortie de la carte de transport est de 5 dBm.
- La puissance minimale à l’entrée de la carte de transport est de 20 dBm.
- Les pertes en puissance considérées sont l’atténuation linéique de la fibre (0.2 dB/km), les pertes d’insertion des multiplexeurs (9 dB), des démultiplexeurs (9 dB) et des compensateurs de dispersion chromatiques (7 dB).
- La marge de sécurité considérée lors du calcul du budget de puissance est de 2 dB.
- Le type de compensation considéré est la post-compensation; le compensateur est installé à l’extrémité destination de la fibre optique.
- Le coefficient de dispersion chromatique est de 17 ps/nm*km
- Les types d’amplification considérés sont :

-
- Pré-amplification : il s'agit d'installer un seul amplificateur en aval de la fibre optique, juste avant la réception du signal par le port d'entrée de la carte de transport.
 - Amplification en ligne uniforme : Il s'agit d'installer sur la fibre optique des amplificateurs à distances égales.
 - Amplification en ligne et pré-amplification : Il s'agit d'installer un ou plusieurs amplificateurs en ligne suivis d'un pré-amplificateur.
-
- Le gain maximal des amplificateurs est de 20 dB.
 - Le gain minimal des amplificateurs est de 5 dB.
 - Le facteur de bruit optique des amplificateurs est 4.
 - Le bruit considéré est celui généré par l'amplificateur, il s'agit du bruit optique lié à l'émission spontanée amplifiée (ASE) (Amplified Spontaneous Emission).
 - La régénération 3R est possible par l'ajout de cartes de transport au nœud considéré.
 - L'OSNR minimale est de 30.

3.5.2.1 Contrainte de dispersion chromatique

La contrainte de dispersion chromatique peut s'exprimer par : pour chaque segment de la solution de la couche réseau, il s'agit de déterminer si l'on doit ajouter ou pas de la compensation à l'extrémité de chacune des fibres optiques qui le composent.

Si la distance totale parcourue par le signal optique (la longueur en kilomètres du segment) dépasse une certaine longueur critique, la dispersion chromatique devient trop importante et un compensateur doit être installé à l'extrémité destination de chacune des fibres optiques du segment, il s'agit en fait de post-compensation [8].

3.5.2.2 Contrainte de budget de puissance

La contrainte de budget de puissance peut s'exprimer par: pour chaque segment de la solution de la couche réseau, il s'agit de calculer le gain total d'amplification pour que le signal puisse atteindre sa destination avec une puissance suffisamment élevée pour être détectée par le port d'entrée de la carte de transport.

Le calcul du gain d'amplification se fait par fibre optique pour chaque longueur d'onde à l'intérieur d'un même segment.

Soit $k \geq 1$ la k -ième fibre optique d'un segment S .

– Nous déterminons le budget de puissance PB_k de la k -ième fibre par :

$$PB_k = P_{input_k} - P_{output_k}$$

P_{input_k} : Puissance du signal optique à l'entrée de la k -ième fibre optique

P_{output_k} : Puissance du signal optique à la sortie de la k -ième fibre optique

– Nous déterminons la perte en puissance PL_k de la k -ième fibre par :

$$PL_k = Att * L_k + MuxIL + DMuxIL + DCUIL - AmpG_k$$

Att : Atténuation de fibre optique (dB)

L_k : Longueur de la k -ième fibre optique (km)

$MuxIL$: Perte d'insertion par port du Mux à l'entrée de la k -ième fibre optique (dB)

$DMuxIL$: Perte d'insertion par port du DMux à la sortie de la k -ième fibre optique (dB)

$DCUIL$: Perte d'insertion du DCU installé dans la k -ième fibre optique (dB)

$AmpG_k$: Gain total des amplificateurs déjà existants dans la k -ième fibre optique (dB)

Une marge de sécurité de 2 dB est prise en compte dans le calcul du gain pour chacun des segments de la solution.

– Nous déterminons la marge de puissance PM_k de la k -ième fibre par :

$$PM_k = PB_k - PL_k$$

– Nous déterminons le gain d'amplification G_k de la k -ième fibre par :

$$Si (PM_k) < 0) G_k = AmpG_k - PM_k$$

$$\text{Sinon } G_k = \text{Amp}G_k$$

Le gain total G d'un segment S est calculé en sommant les gains d'amplifications de chacune des fibres optiques du segment.

$$G = \sum_{k \in S} G_k$$

3.5.2.3 Contrainte de bruit optique

La contrainte de bruit optique peut s'exprimer par : pour chaque segment de la solution de la couche réseau, il s'agit de déterminer si le rapport signal sur bruit optique (OSNR) du signal optique demeure supérieur au rapport signal sur bruit minimal du port d'entrée de la carte de transport. Un rapport signal sur bruit minimal de 30 correspond à un taux d'erreur inférieur à la valeur standard de 10^{-12} .

Nous calculons le rapport signal sur bruit optique fibre optique par fibre optique pour chaque longueur d'onde à l'intérieur d'un même segment.

Soient :

- $k \geq 1$: La k -ième fibre optique d'un segment
- P_k : Puissance du signal optique à l'entrée de la k -ième fibre
- PL_k : La perte en puissance de la k -ième fibre optique
- N_k : Le nombre d'amplificateurs optiques de la k -ième fibre optique
- $1 \leq i \leq N_k$: Le i -ème amplificateur optique de la k -ième fibre optique
- $G_{i,k}$: Le gain de l' i -ème amplificateur de la k -ième fibre optique
- NF : Le facteur de bruit optique
- $P_{in_{i,k}}$ La puissance à l'entrée de l' i -ième amplificateur de la k -ième fibre optique
- $OSNR_{i,k}$: L'OSNR à la sortie de l' i -ième amplificateur de la k -ième fibre optique

– *En configuration de Pré-amplification (Figure 3.6)*



Figure 3.6 : Pré-amplification

En configuration de pré-amplification, l'étude dans [14] nous permet de déterminer la valeur de l'OSNR à la sortie de la k-ième fibre optique d'un segment par la formule suivante :

$$OSNR_{N_k,k} = 10 \log \left(\frac{10^{\frac{P_k - PL_k}{10}} * 10^{-03}}{h\nu\Delta f 10^{\frac{NF}{10}}} \right)$$

$$h = 6.6260 E^{-34}$$

$$\nu = \frac{3E^{+05}}{1550 E^{+09}} = 1.935E^{+14}$$

$$\Delta f = 12.5E^{+09} \text{ Pour un signal OC-48}$$

$$\Delta f = 62.5E^{+09} \text{ Pour un signal OC-192}$$

– *En configuration d'amplification en ligne uniforme (Figure 3.7)*

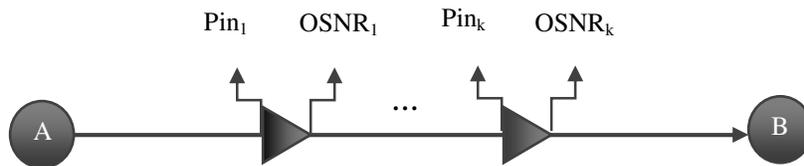


Figure 3.7 : Amplification en ligne uniforme

En configuration d'amplification en ligne uniforme, l'étude dans [14] nous permet de déterminer la valeur de l'OSNR à la sortie de la k-ième fibre optique d'un segment par la formule suivante :

Pour $1 \leq i \leq N_k$

$$OSNR_{i,k} = 10 \log \left(\frac{1}{\frac{1}{10^{OSNR_{i-1,k}/10}} + \left(\frac{10^{\frac{NF}{10}} h\nu \Delta f}{(Pin_{i,k})/10} \right)} \right)$$

$$OSNR_{0,k} = \infty$$

$$Pin_{0,k} = P_k$$

$$G_{0,k} = 0$$

$$Pin_{i,k} = Pin_{i-1,k} + G_{i-1,k} - \frac{PL_k}{N_k + 1}$$

Il est possible de calculer l' $OSNR_{N_k,k}$ à la sortie de la k-ième fibre optique à l'aide de la formule suivante [14] :

$$OSNR_{N_k,k} = 58 + P_k - \Gamma - NF - 10 \log(N_k)$$

$$\Gamma = \frac{PL_k}{N_k + 1}$$

Pour le premier amplificateur :

- La puissance en entrée = $P_k - \Gamma$ (dBm)
- Le bruit optique en entrée = $-\infty$
- L'OSNR à l'entrée = $+\infty$
- La puissance en sortie (dBm) = La puissance en entrée (dBm) + $G_{1,k}$ (dB)
- Le bruit optique en sortie (dBm) = $NF + G_{1,k}$ (dB) - 58 (dBm)
- L'OSNR en sortie (dBm) = La puissance en sortie (dBm) - Le bruit optique en sortie (dBm)

Pour les amplificateurs suivants :

- La puissance en entrée du i+1-ième amplificateur = $P_k - \Gamma + G_{i,k}$ (dBm)
 - Le bruit optique en entrée du i+1ième amplificateur (dB) = Le bruit optique en entrée du i-ième amplificateur - Γ (dB)
 - L'OSNR à l'entrée du i+1ième amplificateur (dBm) = L'OSNR à la sortie du ième amplificateur (dBm)
 - La puissance en sortie du i+1ième amplificateur (dBm) = La puissance en entrée du i+1-ième amplificateur (dBm) + $G_{i,k}$ (dB)
 - Le bruit optique de l'amplificateur = $10^{\frac{NF}{10}} h\nu\Delta f$ (dB)
 - Le bruit optique en sortie du i+1 ième amplificateur (dBm) = $10 \log (1000 \times (\text{Le bruit optique en entrée du k+1ième amplificateur} + \text{bruit optique de l'amplificateur}) \times 10^{\frac{G_{i,k}}{10}})$
 - L'OSNR en sortie (dBm) = La puissance en sortie du i+1ième amplificateur (dBm) - Le bruit optique en sortie du i+1 ième amplificateur (dBm)
- **Le dernier amplificateur est un préamplificateur et le reste des amplificateurs sont en configuration d'amplification en ligne uniforme (Figure 3.8).**

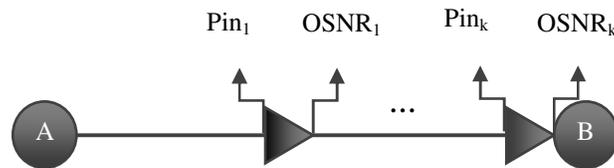


Figure 3.8 : Amplification en ligne uniforme et Pré-amplification

Pour $N_k \geq 1$ et $i \geq 1$

$$OSNR_{i,k} = 10 \log \left(\frac{1}{\frac{1}{10^{\frac{OSNR_{i-1,k}}{10}}} + \left(\frac{10^{\frac{NF}{10}} h\nu\Delta f}{\frac{(Pin_{i,k})}{10} * 10^{-03}} \right)} \right)$$

$$OSNR_{0,k} = \infty$$

$$Pin_{0,k} = P_k$$

$$G_{0,k} = 0$$

$$Pin_{i,k} = Pin_{i-1,k} + G_{i-1,k} - \frac{PL_k}{N_k}$$

3.6 Éléments de conception de la couche réseau

D'après l'étude faite dans [8] La définition de tous les flots d'une solution constitue le routage, le groupage et l'affectation de longueurs d'ondes et de ce fait la conception de la couche réseau.

Exemple de solution du problème GRWA

Soit le réseau de la figure 3.9.

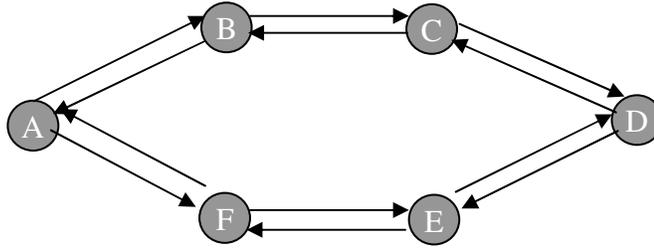


Figure 3.9 : Exemple de réseau

Supposons que nous avons 20 requêtes OC-12 débutant toutes au nœud A et se dirigeant toutes vers le nœud D. Ceci équivaut donc à 240 requêtes de débit OC-1. Soit k_{AD} la demande de trafic qui relie le nœud A au nœud D avec un débit équivalent à une capacité de transport OC-240.

Nous avons 2 chemins qui relient le nœud A au nœud D :

$$C_{AD} = \{c_{AD}^1, c_{AD}^2\}$$

$$\text{Avec } c_{AD}^1 = \{e_{AB}, e_{BC}, e_{CD}\} \text{ et } c_{AD}^2 = \{e_{AF}, e_{FE}, e_{ED}\}.$$

Le routage, le groupage et l'affectation de longueurs d'ondes se traduisent par l'intermédiaire des flots. Ainsi, une solution possible pour satisfaire la demande de trafic est constituée des deux flots suivants :

Flot 1 Source : nœud A
 Destination : nœud D
 Chemin physique : c_{AD}^1 ,
 Débit : OC-192
 Longueur d'onde : λ_1 .

Flot 2 Source : nœud A
 Destination : nœud D
 Chemin physique : c_{AD}^2
 Débit : OC-48
 Longueur d'onde : λ_1 .

Pour une solution donnée, nous trouvons sur chaque longueur d'onde de chaque lien un certain débit qui y transite. Ce débit représente la somme des débits des requêtes qui empruntent ce lien et cette longueur d'onde.

Pour chaque longueur d'onde de chaque lien, nous associons toujours une des trois capacités suivantes : OC-0, OC-48 ou OC-192. La capacité OC-0 ne peut être allouée que si aucun débit ne transite par cette longueur d'onde sur ce lien (soit si la longueur d'onde sur ce lien est inutilisée). La capacité OC-48 peut être allouée seulement si le débit total ne dépasse pas OC-48. Sinon, la capacité affectée à la longueur d'onde du lien doit être la capacité maximale, qui est d'OC-192. Ainsi, dans la solution de l'exemple précédent, la longueur d'onde λ_1 sur les liens $\{e_{AB}, e_{BC}\}$ a une capacité OC-192 alors que la longueur d'onde λ_1 sur les liens $\{e_{AD}, e_{DE}, e_{EC}\}$ peut avoir une capacité OC-48 ou OC-192. Notons aussi que sur une même fibre optique, plusieurs longueurs d'ondes qui ont des capacités différentes peuvent voyager ensemble sans problème.

Dans une fibre optique, une longueur d'onde ne peut pas transporter un débit plus élevé qu'OC-192. Si une solution possède au moins une longueur d'onde sur un lien où le débit transité est supérieur à OC-192, alors nous dirons que la solution est irréalisable.

Exemple illustrant la notion d'interruption

Soit le réseau de la figure 3.10 transportant les flots suivants :

Flot 1 Source : nœud A
 Destination : nœud C
 Débit : OC-48
 Longueur d'onde : λ_1

Flot 2 Source : nœud B
 Destination : nœud C
 Débit : OC-12
 Longueur d'onde : λ_1 .

Le flot 1 est interrompu au nœud B, car il y a ajout du flot 2 sur la même longueur d'onde λ_1 .

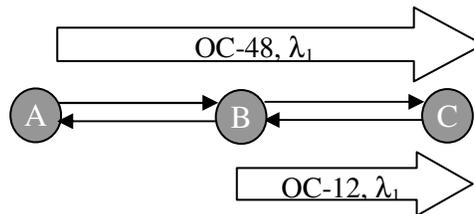


Figure 3.10 : Exemple de flot interrompu

Si deux flots se croisent sur la même longueur d'onde à un nœud donné, il n'y aura pas d'interruption engendrée puisque les signaux optiques n'ont pas à interagir entre eux entre la source et la destination. Nous dirons que chacun des deux flots a utilisé une autoroute « *bypass* » au nœud de croisement, c'est-à-dire que chacun des deux flots a passé du lien entrant vers le lien sortant approprié au nœud de croisement sans s'y être interrompu.

Soit le réseau de la figure 3.11 transportant les flots suivants :

Flot 1 Source : nœud A
 Destination : nœud C
 Débit : OC-48
 Longueur d'onde : λ_1

Flot 2 Source : nœud B
 Destination : nœud E
 Débit : OC-48
 Longueur d'onde : λ_1

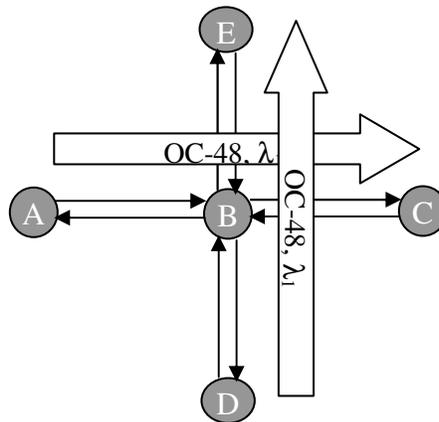


Figure 3.11 : Exemple de flot croisé

Lorsqu'un flot subit une interruption, cela introduit un certain délai dans la transmission. La partie du chemin physique d'un flot qui ne subit aucune interruption constitue un segment ou encore un saut optique.

Exemple illustrant la notion de segment ou saut optique

Soit le réseau de la figure 3.12 transportant les flots suivants :

Flot 1 Source : nœud A
 Destination : nœud C
 Débit : OC-48
 Longueur d'onde : λ_1

Flot 2
Source : nœud B
Destination : nœud C
Débit : OC-48
Longueur d'onde : λ_1

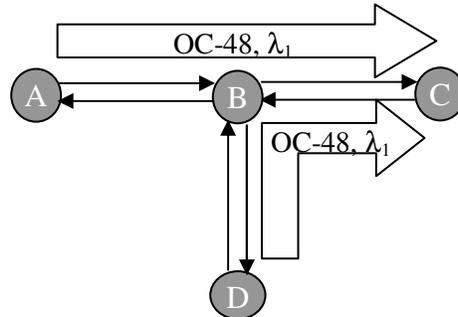


Figure 3.12 : Exemple de segments

Trois segments peuvent être identifiés :

Segment 1 Source : nœud A
Destination : nœud B
Débit : OC-48
Longueur d'onde : λ_1
Flots transportés : flot 1

Segment 2 Source : nœud D
Destination : nœud B,
Débit : OC-48
Longueur d'onde : λ_1
Flots transportés : flot 2

Segment 3 Source : nœud B
Destination : nœud C
Débit : OC-96
Longueur d'onde λ_1
Flots transportés : flots 1 et 2

3.6.1 Cartes de transports

Chaque nœud du réseau optique est équipé d'un MSPP. Celui-ci possède un certain nombre de cartes de transport qui permettent d'envoyer et de recevoir des signaux optiques de longueurs d'ondes bien définies.

Chaque carte de transport peut émettre ou recevoir un signal optique dont le débit est celui d'une capacité optique OC-48 ou OC-192. Elle possède aussi un port d'entrée et un port de sortie. À ces ports nous associons le débit de la carte à laquelle ils appartiennent. Nous associons à chaque port d'entrée une fibre entrante du nœud avec une longueur d'onde et à chaque port de sortie, une fibre sortante du nœud avec la même ou une autre longueur d'onde. Pour une carte donnée, la longueur d'onde à laquelle est associé chacun de ses deux ports peut être différente. La seule restriction est que le débit supporté par le port d'entrée soit le même que celui supporté par le port de sortie. Notons qu'il est aussi possible qu'un port d'une carte soit inutilisé. La figure 3.13 illustre une situation où des cartes de transport à un nœud donné traitent des signaux de différentes longueurs d'ondes.

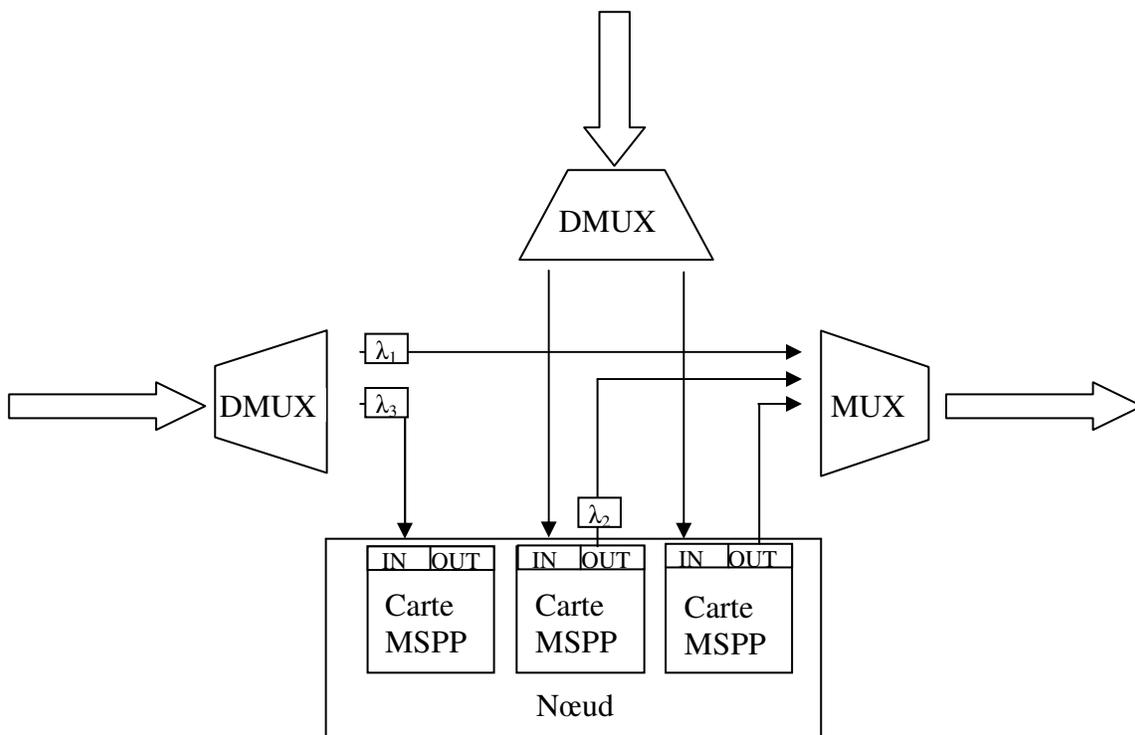


Figure 3.13 : Les cartes de transport à un nœud donné [8]

De cette manière, si, au nœud v , une requête doit être ajoutée sur la fibre sortante e et sur la longueur d'onde λ , alors il faut qu'il y ait une carte de transport à ce nœud dont le port de sortie est connecté sur le lien e et sur la longueur d'onde λ pour pouvoir générer le signal. C'est ce qui se passe pour la longueur d'onde λ_2 à la figure 3.13. Le même principe s'applique pour une requête qui doit être reçue au port d'entrée d'une carte de transport. De plus, la capacité du port de sortie sur lequel le signal d'une requête est généré doit être la même que celle du port d'entrée de l'autre nœud qui recevra la requête.

Il est important de noter ici que les nœuds peuvent accueillir autant de cartes de transport que nécessaire.

La configuration de ces cartes de transport est ce qui conduit à la conception la couche réseau du réseau optique.

3.6.2 Coût de la couche réseau

Le coût de la couche réseau correspond au coût total des cartes de transport nécessaires à sa conception.

$$\text{Coût des cartes de transport} = (\text{nombre de cartes OC-48} \times \text{coût d'une carte OC-48}) + (\text{nombre de cartes OC-192} \times \text{coût d'une carte OC-192}).$$

Le tableau 3.3 indique les coûts des cartes de transport OC-48 et OC-192 :

	Coût
Carte OC-48	4 k\$
Carte OC-192	10 k\$

Tableau 3.3 : Coût des cartes de transport [8]

3.7 Éléments de conception de la couche physique

La solution multicouche du problème GRWA est construite à partir de sa solution réseau à laquelle on ajoute la compensation de dispersion chromatique, l'amplification optique et la régénération 3R lorsque cela est nécessaire.

3.7.1 La compensation de dispersion chromatique

Lorsqu'un signal optique WDM parcourt une longue distance dans une fibre optique, il subit l'effet de la dispersion chromatique et un compensateur doit être installé à l'extrémité destination de la fibre optique, on parle alors de post-compensation.

Il faut noter qu'un compensateur installé sur une fibre compense simultanément toutes les longueurs d'ondes passant par cette fibre.

La distance à partir de laquelle la dispersion chromatique est ressentie dépend du débit du signal WDM transporté par la fibre optique.

Le tableau 3.3 indique les distances limites au-delà desquelles un signal optique a besoin d'un compensateur de dispersion chromatique.

	Distance limite
Signal OC-48	500 km
Signal OC-192	80 km

Tableau 3.3 : Distance limite sans compensation [8]

Nous associons à un compensateur deux caractéristiques : le lien qui doit être compensé et le nombre de kilomètres de fibre de transport pour lesquels le compensateur doit compenser la dispersion chromatique.

S'il n'est pas interrompu, un signal optique peut traverser plusieurs fibres optiques du réseau avant d'arriver à destination : ceci constitue un segment. Nous appliquons les mêmes règles définies dans [8] à savoir si la distance totale du segment parcourue par le signal optique est

inférieure à la distance limite, alors aucun compensateur n'est installé sur le segment. Dans le cas contraire nous appliquons la règle suivante : une post-compensation doit être ajoutée à l'extrémité destination de chacune des fibres optiques utilisée par le segment. Notons que la quantité de dispersion chromatique à compenser est toujours égale à la quantité de dispersion chromatique accumulée par le signal optique lorsque celui-ci traverse la fibre sur laquelle est installé le compensateur.

3.7.1.2 Procédure d'ajout de compensateurs de dispersion chromatique

Comme décrit dans [8], nous commençons par identifier tous les segments de la solution courante. Ensuite, nous calculons la longueur de chacun de ces segments et nous retiendrons seulement ceux dont la longueur est supérieure ou égale à la longueur limite pour la capacité du signal. Nous appliquons alors de la post-compensation à l'extrémité destination de chaque lien faisant partie de chaque segment retenu.

3.7.1.3 Coût de la compensation

Nous utilisons la même structure de coût que l'étude dans [8], à savoir que le coût de la compensation est composé d'une partie fixe commune à tous les liens compensés du réseau optique et une partie variable qui dépend de la longueur du lien à compenser. Donc, pour chaque lien à compenser, nous calculons le coût par :

$$\text{Coût de la compensation} = (\text{coût fixe}) + (\text{longueur du lien en km} \times \text{coût par km}).$$

Ensuite, il s'agit simplement de faire la somme des coûts pour chacun des liens pour obtenir le coût total de la compensation.

Le tableau 3.4 indique les coûts reliés à la compensation :

Coût fixe	1 k\$
Coût par kilomètre	375 \$ / km

Tableau 3.4 : Coûts de la compensation

Exemple illustrant la logique d'ajout de compensateurs de dispersion chromatique :

Soit le réseau de la figure 3.14

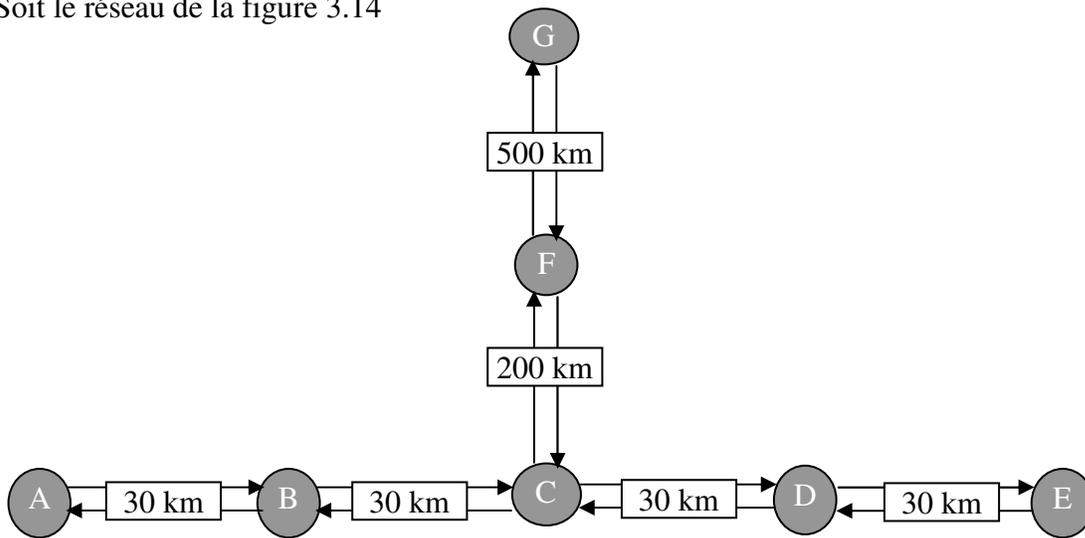


Figure 3.14 : Exemple de réseau avec compensation

Il transporte les deux flots suivants :

Flot 1 Source : Nœud A
 Destination : Nœud E
 Débit : OC-96
 Longueur d'onde : λ_1

Flot 2 Source : Nœud F
 Destination : Nœud E
 Débit : OC-48
 Longueur d'onde : λ_1

Pour pouvoir transporter ces flots, il faut trois segments.

Segment 1 Source : Nœud A
 Destination : Nœud C
 Longueur : 60 km
 Débit : OC-96
 Signal : OC-192

Longueur d'onde : λ_1

Segment 2 Source : Nœud F
 Destination : Nœud C
 Longueur : 200 km
 Débit : OC-48
 Longueur d'onde : λ_1

Segment 3 Source : Nœud C
 Destination : Nœud E
 Longueur : 60 km
 Débit : OC-192
 Longueur d'onde λ_1

Aucun équipement de compensation n'est nécessaire, car la longueur de tous les segments est en deçà de la distance limite permise. Le coût de la compensation est donc nul.

Considérons les 4 flots suivants :

Flot 1 Source : nœud A
 Destination : nœud C
 Débit : OC-192
 Longueur d'onde : λ_1

Flot 2 Source : nœud B
 Destination : nœud E
 Débit : OC-192
 Longueur d'onde : λ_2

Flot 3 Source : nœud G
 Destination : nœud D
 Débit : OC-2

Longueur d'onde : λ_3

Flot 4 Source : nœud F
 Destination : nœud D
 Débit : OC-48
 Longueur d'onde : λ_3

Pour pouvoir transporter ces flots, il faut quatre segments.

Segment 1 Source : nœud A
 Destination : nœud C
 Longueur : 60 km
 Débit : OC-192
 Longueur d'onde : λ_1 .

Segment 2 Source nœud B
 Destination : nœud E
 Longueur : 90 km
 Débit : OC-192
 La longueur d'onde : λ_2

Segment 3 Source : nœud G
 Destination : nœud F
 Longueur : 500 km
 Débit : OC-2
 Longueur d'onde λ_3 .

Segment 4 Source : nœud F
 Destination : nœud D
 Longueur : 230 km
 Débit : OC-50
 La longueur d'onde : λ_3

Dans cet exemple, nous avons 3 segments dont la longueur dépasse la distance limite, il s'agit des segments 2, 3 et 4. Il faut donc placer de la compensation à l'extrémité destination de chaque lien appartenant à chacun de ces segments. Il faudra donc compenser les liens suivants:

Lien B-C (30 km) : il fait partie du segment 2;

Lien C-D (30 km) : il fait partie des segments 2 et 4;

Lien D-E (30 km) : il fait partie du segment 2;

Lien G-F (500 km) : il fait partie du segment 3;

Lien F-C (200 km) : il fait partie du segment 4.

Pour déterminer le coût, nous utiliserons les valeurs du tableau 3.4

Voici donc les coûts relatifs à la compensation pour chaque lien compensé :

Lien B-C (30 km) : le coût est de $2\,000 \$ + 30 \text{ km} \times 375 \$ / \text{km} = 13\,250 \$$,

Lien C-D (30 km) : le coût est de $2\,000 \$ + 30 \text{ km} \times 375 \$ / \text{km} = 13\,250 \$$,

Lien D-E (30 km) : le coût est de $2\,000 \$ + 30 \text{ km} \times 375 \$ / \text{km} = 13\,250 \$$,

Lien G-F (500 km) : le coût est de $2\,000 \$ + 500 \text{ km} \times 375 \$ / \text{km} = 189\,500 \$$,

Lien F-C (200 km) : le coût est de $2\,000 \$ + 200 \text{ km} \times 375 \$ / \text{km} = 77\,000 \$$.

Le coût total de la compensation est de 306 250 \$.

3.7.2 Le budget de puissance et l'amplification optique

L'amplification optique est directement liée au budget de puissance. Ce dernier consiste à calculer pour chaque lien et pour chacune de ses longueurs d'ondes la puissance du signal optique à l'entrée et à la sortie de la fibre. Pour qu'un signal optique atteigne sa destination, il

doit être assez puissant pour être détecté par le nœud destination. Pour ce faire des amplificateurs optiques de type EDFA sont installés selon l'une des configurations suivantes :

- Pré-amplification : il s'agit d'installer un seul amplificateur en aval de la fibre optique, juste avant la réception du signal par le port d'entrée de la carte de transport.
- Amplification en ligne uniforme : Il s'agit d'installer sur la fibre optique des amplificateurs à distances égales.
- Amplification en ligne et pré-amplification : Il s'agit d'installer un ou plusieurs amplificateurs en ligne suivis d'un pré-amplificateur.

3.7.2.1 Procédure d'ajout d'amplificateurs optiques

Après ajout de la compensation, nous calculons la perte en puissance PL , le budget de puissance PB et la marge de puissance PM du signal de chaque longueur d'onde de chaque fibre optique de la solution compensée. Nous déterminons ensuite le gain d'amplification $G = -PM$ de chaque longueur d'onde du signal circulant dans la fibre optique.

Le calcul du gain d'amplification pour chaque longueur d'onde exige une mise à jour continue du gain d'amplification de chaque fibre dont le signal est amplifié. La valeur finale de ce gain correspond au gain d'amplification de la longueur d'onde dont la marge de puissance est la plus élevée.

Soient :

- $AmpNb$: le nombre d'amplificateurs déjà existant sur la fibre optique
- $AmpG$: le gain total d'amplificateurs déjà existants sur la fibre optique
- $[Gmin, Gmax]$: la gamme de gain disponible
- $G = -PM$: le gain du nouvel amplificateur ajouté à la fibre optique.

$$G = q * Gmax + r$$

(q,r) : le quotient et le reste de la division euclidienne de G par $Gmax$

Nous avons développé la procédure suivante pour mettre à jour le gain d'amplification $AmpG$ de la fibre optique et du nombre d'amplificateurs $AmpNb$ qui y sont installés:

```

Si (G ≤ Gmax)
  AmpG = G
  AmpNb = 1
Sinon
  Si (G > Gmax) Et (r=0)
    AmpG = G
    AmpNb = AmpNb + q
  Sinon
    Si (G > Gmax) Et (r≠0)
      AmpG = q×Gmax + max(Gmin, r)
      AmpNb = AmpNb + q+1
    Fin Si
  Fin Si
Fin Si

```

3.7.2.2 Coût de l'amplification optique

Le coût de l'amplification est calculé en fonction du nombre d'amplificateurs optiques installés sur la fibre optique. Nous le déterminons à l'aide de la formule suivant :

$$\text{Coût de l'amplification} = \text{nombre d'amplificateurs optiques} \times \text{coût d'un amplificateur.}$$

Pour obtenir le coût total de l'amplification il suffit de faire la somme des coûts d'amplification de toutes les fibres du réseau optique.

Le tableau 3.5 indique le coût d'un amplificateur optique

	Coût
Amplificateur EDFA 1550 nm	1 k\$

Tableau 3.5 : Coûts d'amplification

3.7.3 Le bruit optique et la régénération 3R

Le bruit optique considéré dans le cadre de cette recherche est celui induit par l'amplification par émission spontanée (ASE). L'évaluation du bruit se fait en calculant pour chaque fibre optique le rapport signal sur bruit optique (OSNR) du signal de chacune des longueurs d'ondes qui la traversent. Pour qu'un signal optique atteigne sa destination, il doit subir moins de bruit et par conséquent son OSNR doit être assez élevé pour être détecté par le nœud destination.

Dans le cas où l'OSNR du signal est insuffisant, un régénérateur 3R est installé dans le nœud source de la fibre optique pour la longueur d'onde considérée.

3.7.3.1 Procédure d'ajout de régénérateurs 3R

Après ajout de l'amplification, nous calculons l'OSNR du signal de chaque longueur d'onde de chaque fibre optique de la solution amplifiée. Nous déterminons ensuite si on doit ajouter ou pas de la régénération 3R.

Pour se faire nous exécutons l'algorithme suivant :

Soient :

- *PL* : la perte en puissance d'un signal optique
- *SegmentPL*: la perte en puissance du segment courant
- *SegmentAmpNb* : le nombre d'amplificateur installé sur le segment
- *SegmentOSNR* : l'OSNR du signal à la sortie du segment courant
- *OSNR(SegmentPL,AMPNb)*: est une fonction qui permet de calculer l'OSNR d'un segment connaissant sa perte en puissance et le nombre d'amplificateurs qui y sont installés
- *TC_OSNR_RX_MIN*: l'OSNR minimal pour que le signal soit détecté et reçu adéquatement par le port d'entrée de la carte de transport.

```
Pour chaque chemin optique
```

```
  SegmentPL = 0
```

```
  SegmentAmpNb = 0
```

```
  Pour chaque segment
```

```
    Pour chaque lien du segment
```

```
      NœudDestination = Nœud Destination du lien courant
```

```
      NœudPrécédent = Nœud Source du lien courant
```

```
      SegmentPL += PL du lien courant
```

```
      SegmentAmpNb += Nombre d'amplificateurs du lien courant
```

```
      SegmentOSNR = OSNR(SegmentPL,AMPNb)
```

```
      Si (SegmentOSNR < TC_OSNR_RX_MIN)
```

```
        Si (NœudPrécédent n'a pas de 3R)
```

```
          Ajouter un 3R au NœudPrécédent
```

```

Mettre à jour l'OSNR du NœudDestination
    SegmentPL = 0
    SegmentAmpNb = 0
    Continue
Sinon
    //Solution irréalisable
    Retirer le 3R du NœudPrécédent
    Mettre à jour l'OSNR du NœudDestination
    Exit
    Fin pour chaque lien du segment
Fin pour chaque segment
Fin Pour chaque chemin optique

```

3.7.3.2 Coût de la régénération 3R

Le coût de la régénération correspond à l'ajout d'un port ou d'une carte de transport dont la longueur d'onde et le débit correspondent au signal dont l'OSNR est le plus faible. En plus du coût de la carte de transport, une interruption est aussi ajoutée. Nous calculons le coût de la régénération 3R par :

Coût de la régénération 3R. = (nombre de cartes 3R OC-48 × coût d'une carte OC-48) + (nombre de cartes 3R OC-192 × coût d'une carte OC-192).

Les coûts des cartes OC-48 et OC-192 sont définis dans le tableau 3.2.

3.8 Heuristiques Tabou de résolution multicouche du problème GRWA

L'approche Tabou utilisée dans la résolution multicouche du problème GRWA est du type multi-phase. Une phase est composée d'un ensemble de mouvements qui permettent d'explorer l'espace de solutions à la recherche d'une solution optimale.

L'exécution des deux heuristiques Tabou développées dans le cadre de ce projet de recherche suit l'organigramme de la figure 3.15. Elles prennent comme entrée la demande de trafic, la topologie du réseau et le nombre de longueurs d'ondes. Elles commencent par construire une

représentation interne du réseau et de sa demande de trafic. Elles génèrent ensuite une solution initiale. Cette dernière constitue le point de départ pour l'exploration de l'espace de solutions. Les mouvements constituant les phases sont méconnus à ce stade. La liste Tabou, est mise à jour régulièrement et enregistre les derniers mouvements effectués par chacune des phases. Elles possèdent trois conditions d'arrêts. La première dépend du nombre d'itérations, la deuxième dépend du temps d'exécution et la dernière dépend de l'évolution de la solution courante; c'est-à-dire que lorsque la solution n'est pas améliorée après un certain nombre d'itérations, celle-ci est alors considérée optimale

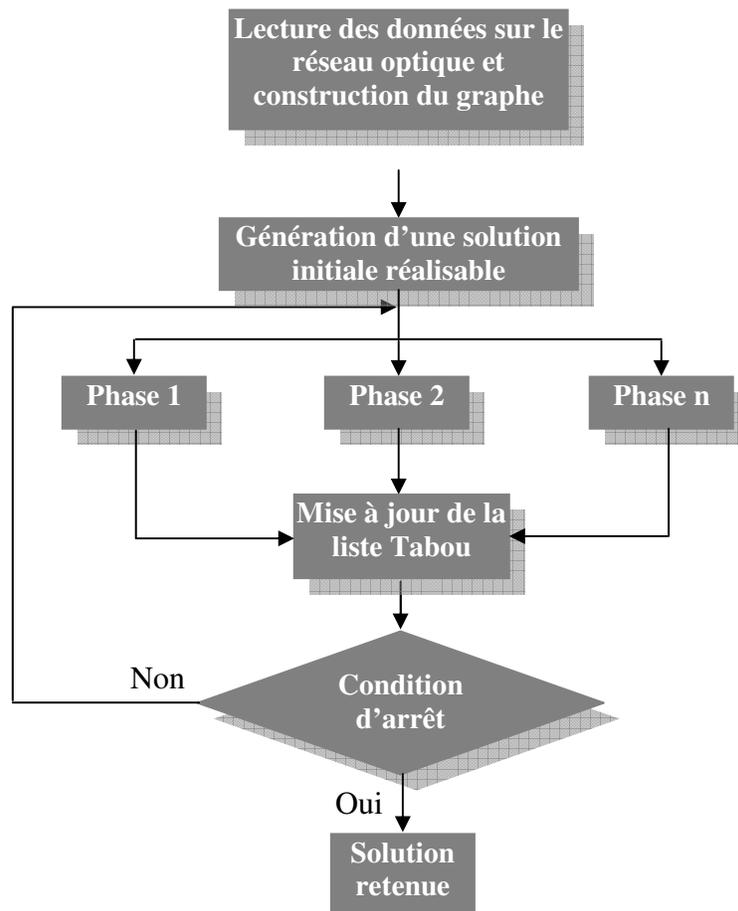


Figure 3.15 : Approche Tabou multi-phase de résolution du problème *GRWA*

Les solutions retenues par les deux heuristiques constituent alors le résultat de l'optimisation multicouche du problème *GRWA*. Elles respectent à la fois les contraintes de la couche réseau en termes de groupage, de routage et d'affectation de longueurs d'ondes et les contraintes de la

couche physique à savoir le budget de puissance, la dispersion chromatique et le niveau de bruit.

3.8.1 Heuristique Tabou multicouche d'optimisation séquentielle des réseaux optiques

L'heuristique multicouche d'optimisation séquentielle des réseaux optiques résout d'abord le problème GRWA en tenant compte des contraintes réseaux seulement, pour ensuite bâtir sa couche physique sans aucune optimisation. Les inconvénients de cette façon de faire sont qu'on perd le couplage entre les contraintes réseaux et physiques et que la réalisabilité physique est parfois impossible à atteindre. La solution peut donc demeurer irréalisable physiquement. Pour ce faire nous avons utilisé la même heuristique que [8] pour résoudre le problème GRWA et optimiser la conception de la couche réseau. La couche physique est bâtit au dessus de la solution réseau optimale trouvé selon la même hiérarchie définit dans la figure 3.16.

3.8.2 Heuristique Tabou multicouche d'optimisation simultanée des réseaux optiques

L'heuristique multicouche d'optimisation simultanée des réseaux optiques résout le problème GRWA en tenant compte simultanément des contraintes des couches réseaux et physiques chaque fois que la solution opère un mouvement dans l'espace de solutions. Plus précisément, on vérifie la réalisabilité physique de chacun des chemins optiques impliqués dans le mouvement opéré par la solution. On est aussi capable d'obtenir une hiérarchie de solutions multicouches du problème GRWA en considérant une partie ou la totalité des contraintes de la couche physique. Par exemple si on considère seulement la contrainte de dispersion chromatique, nous obtenons une solution réseau réalisable notée N, et une solution multicouche du problème GRWA notée NC. Si on ajoute la contrainte de budget de puissance, l'heuristique nous produit en plus des solutions précédentes une solution multicouche avec amplification seulement notée NA et une autre solution multicouche combinant l'amplification et la dispersion chromatique notée NCA.

Dans le cas général où nous considérons les trois contraintes de la couche physique, nous obtenons une hiérarchie de solutions dont la racine est la solution réseau initiale au problème GRWA (N) et dont les feuilles sont occupées par les solutions multicouches du problème GRWA reliées aux combinaisons de contraintes physiques considérées (NA, NC, NAR, NCA et NCAR).

La figure 3.16 montre la hiérarchie des solutions :

- N : Solution réseau réalisable
- NC : Solution réseau dont la couche physique respecte la contrainte de dispersion chromatique
- NA : Solution réseau dont la couche physique respecte la contrainte de budget de puissance
- NCA : Solution réseau dont la couche physique respecte les contraintes de dispersion chromatique et de budget de puissance
- NAR : Solution réseau dont la couche physique respecte les contraintes de budget de puissance et de niveau de bruit
- NCAR : Solution réseau dont la couche physique respecte les contraintes de dispersion chromatique, de niveau de puissance et de niveau de bruit

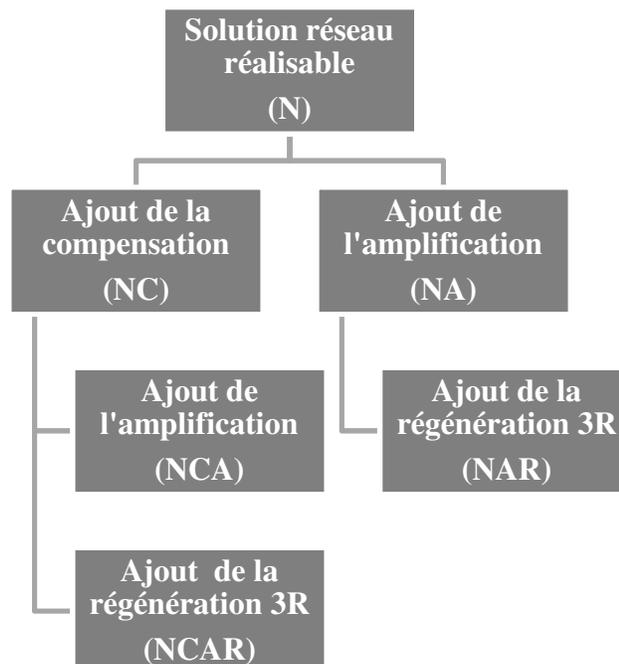


Figure 3.16 : Hiérarchie des solutions du problème GRWA en fonction des contraintes physiques

3.8.3 Construction de la solution initiale

Comme dans [8], la solution initiale est construite de façon à maximiser l'utilisation de la bande passante. Il s'agit donc de regrouper les requêtes de demande de trafic de manière à remplir le plus de capacités OC-192 possibles, le reste des requêtes est groupé sur des flots qui seront routés sur les plus courts chemins.

Voici les étapes suivies pour la construction de la solution la solution initiale.

1. Chaque demande de trafic est divisée en un nombre défini de flots de débit OC-192 et au plus un flot dont le débit est compris entre OC-1 et OC-191. Par exemple, si pour une source vers une destination nous avons une demande de trafic k_{sd} qui requiert une bande passante OC-400, elle sera séparée en deux flots OC-192 et un flot OC-16 ($2 \times 192 + 16 = 400$).
2. Les flots sont ordonnés de façon décroissante selon leur débit et chaque flot est routé et affecté à une longueur d'onde selon cet ordre. Lorsqu'il est temps d'affecter un chemin physique au flot, nous commençons par choisir le plus court chemin sur toutes les longueurs d'ondes. La longueur d'onde choisie sera celle qui engendrera la solution de coût minimum tout en restant dans le domaine réalisable. Il se peut qu'emprunter le plus court chemin sur n'importe laquelle des longueurs d'ondes engendre toujours une solution irréalisable. Dans ce cas, nous répétons ce processus avec le deuxième plus court chemin et ainsi de suite jusqu'à épuisement de tous les chemins possibles. Si aucune solution réalisable n'a pu être trouvée, nous admettons alors une solution irréalisable où le flot passe par le plus court chemin.

3.8.4 Exploration de l'espace de solutions

L'exploration de l'espace de solutions se fait de proche en proche à l'aide de mouvements consécutifs dans le but de trouver des solutions de moins en moins coûteuses. Pour ce faire, nous avons utilisé deux types de mouvements; les mouvements de diversification qui permettent d'explorer des régions lointaines de la solution courante et les mouvements d'intensification qui permettent d'explorer son voisinage. L'approche Tabou permet autant

l'exploration du domaine réalisable que celui irréalisable en relâchant certaines contraintes lorsque cela est nécessaire. Cela évite aussi de tomber dans des minimums locaux. Elle permet aussi d'éviter de revisiter la même solution de manière cyclique à l'aide de sa liste Tabou qui mémorise les derniers mouvements effectués

3.8.5 Gestion de la liste Tabou

La liste Tabou conserve les derniers mouvements effectués pour ne pas retomber sur une solution déjà visitée. Ceci a pour objectif d'éviter qu'il n'apparaisse des cycles de solutions lors de l'exploration de l'espace de solutions. En général le nombre de mouvements à mémoriser dans la liste Tabou doit être compris entre 10% et 15 % des mouvements possibles [29].

Comme dans [8], tous les types de mouvements que nous avons utilisés permettent de déplacer un ou plusieurs flots, ainsi, le flot devient l'unité de base des mouvements. Au lieu de conserver les informations du mouvement dans la liste tabou, nous considérons donc les flots comme étant Tabou. C'est-à-dire que lorsqu'un flot est déplacé, il est rendu tabou et ne peut donc pas être déplacé de nouveau pendant un certain nombre d'itérations.

3.8.6 Mouvement - MoveFlot

Il s'agit d'un mouvement d'intensification qui permet l'exploration du voisinage immédiat de la solution courante.

Une fois que nous avons choisis le nœud duquel nous désirons déplacer un flot, nous énumérons tous les flots non tabous qui utilisent au moins un port de ce nœud, que ce soit parce qu'ils y débutent, qu'ils s'y terminent ou qu'ils y passent dû à une interruption. Ensuite, pour chaque flot retenu, nous appliquons le traitement suivant.

1. Le flot est retiré de la solution courante.
2. Le flot est affecté à tour de rôle à l'ensemble des chemins physiques qui relie son nœud source à son nœud destination. Chaque fois que le flot est affecté à un nouveau chemin physique, nous évaluons la nouvelle solution.

-
3. Nous conservons, parmi tous les chemins physiques essayés, celui dont le coût est le plus avantageux. Lorsque le coût de deux ou plusieurs chemins est identique, nous choisissons l'un de ces chemins au hasard.
 4. Le flot testé qui avait été préalablement retiré de la solution est ensuite rétabli à son chemin physique initial.
 5. Nous répétons ensuite les étapes 1 à 4 pour tous les flots retenus initialement.
 6. Ainsi, pour chaque flot qui passe par le nœud choisi, nous connaissons le meilleur chemin physique alternatif. Il s'agit maintenant de sélectionner le flot dont le meilleur déplacement améliore le plus la solution courante.
 7. Il faut maintenant retirer ce flot et l'affecter au nouveau chemin physique choisi. Puis il faut mettre à jour la liste des éléments tabous en y ajoutant ce flot.

3.8.6.1 MoveFlot-subset

Le mouvement « MoveFlot-subset » est similaire au mouvement « MoveFlot » sauf que cette fois on découpe le flot en ne déplaçant que le modulo OC-192 ou OC-48 du débit du flot considéré.

Il s'agit d'une variante du mouvement « MoveFlot ». On commence par découper un flot en deux ou plusieurs flots de plus faible débit. Une partie des flots résultants est ensuite déplacée en utilisant le mouvement « MoveFlot ». Par exemple, il peut être avantageux de découper un flot de débit OC-96 en deux flots OC-48, pour appliquer ensuite le mouvement « MoveFlot ». Il faut mentionner que seuls les flots ayant au moins un débit d'OC-49 sont éligibles à un tel mouvement. Ceci dans le but que le flot original reste toujours avec un débit d'OC-48. Par exemple, si nous voulons déplacer un flot ayant un débit de OC-80, nous nous intéresserons uniquement à déplacer un OC-32 de ce flot.

3.8.6.2 MoveFlot –realizable

Le mouvement « MoveFlot –realizable » est aussi une variante du mouvement « MoveFlot » sauf que cette fois-ci on s'intéresse à tous les flots qui sont à l'origine de la non réalisabilité de la solution même si ceux-ci sont Tabous. Pour ce faire, nous commençons par sélectionner

tous les flots tabous, ou non, et ce peu importe les nœuds par lesquels ils transitent, ensuite nous les déplaçons pour retrouver la réalisabilité de la solution courante.

3.8.7 Mouvement - RemovePort

Il s'agit d'un mouvement de diversification qui permet l'exploration des régions lointaines de la solution courante en redirigeant tous les flots qui passent par un port de manière à le rendre inutilisé.

Le port à supprimer est celui dont le second port de la carte de transport est inutilisé et dont (Le nombre de flots qui passent par ce port dû à une interruption) / (le nombre de flots total qui transitent par ce port) est le plus petit possible pour réduire le nombre d'interruptions.

Avant de supprimer le port, il faut s'assurer que tous les flots qui seront déplacés ne sont pas tabous. Dans le cas où au moins un des flots est tabou, il ne faut pas considérer ce port. Toutefois, dans le cas particulier où par tous les ports transite au moins un flot tabou, alors il faut choisir parmi les ports ceux accommodant un nombre minimum de flots tabous.

Une fois le port à supprimer identifié, nous faisons l'inventaire de tous les flots qui utilisent ce port notamment ceux qui débutent ou terminent à ce port ainsi que les flots qui passent par ce port à cause d'une interruption. Ces flots sont retirés de la solution courante, puis un à un ils sont affectés à de nouveaux chemins physiques en utilisant le mouvement « MoveFlot ».

Notons toutefois qu'il faut s'assurer que le port supprimé ne soit pas recréé immédiatement. La liste Tabou est mise à jour avec les flots qui viennent d'être déplacés. Le port ne peut donc pas être recréé par un de ces flots pour un certain nombre d'itérations. Il peut par contre réapparaître si un tout autre flot requiert sa présence.

3.8.8 Mouvement - RemoveCompensation

Ce mouvement est de même type que le mouvement « RemovePort » dans la mesure où l'on déplace tous les flots à l'origine de la nécessité de compenser un lien cette fois-ci. Il s'agit donc d'un mouvement de diversification qui bouleverse beaucoup la solution courante.

Notons que ce type de mouvement ne peut être effectué que si l'on considère la contrainte de dispersion chromatique lors de l'exécution des heuristiques.

Le lien auquel nous désirons enlever la compensation est celui qui transporte le plus petit nombre de flots à l'origine de la compensation.

Une fois que le lien auquel nous voulons retirer la compensation est choisi, nous faisons l'inventaire de tous les flots qui sont à l'origine de sa compensation. Nous retirons tous ces flots de la solution courante puis nous leurs affectons un à un de nouveaux chemins physiques en utilisant le mouvement « MoveFlot».

Notons qu'il faut s'assurer que les chemins physiques choisis n'empruntent pas le lien auquel nous voulons retirer la compensation, sauf si cela n'est pas possible. Comme par exemple lorsque tous les chemins qui relient une source à une destination passent tous par un certain lien. La liste Tabou est ensuite mise à jour avec tous les flots déplacés.

3.8.9 Mouvement - RemoveAmplifier

Ce mouvement est de même type que le mouvement « RemoveCompensation», puisqu'on déplace tous les flots à l'origine de la nécessité d'ajouter un amplificateur, Il s'agit aussi d'un mouvement de diversification qui bouleverse beaucoup la solution courante.

Notons que ce type de mouvement ne peut être effectué que si l'on considère la contrainte de budget de puissance lors de l'exécution des heuristiques.

Le lien auquel nous désirons réduire le nombre d'amplificateurs est celui par lequel transite le plus petit nombre de flots à l'origine de l'amplification.

Nous commençons par faire une liste de tous les liens amplifiés ainsi que de tous les amplificateurs qui y sont installés. L'objectif est de supprimer un amplificateur dont le gain est le plus petit et par lequel transite le plus petit nombre de flots à l'origine de son ajout.

Une fois que l'on a identifié l'amplificateur à supprimer, nous faisons l'inventaire de tous les flots qui sont à l'origine de son ajout. Nous retirons tous ces flots de la solution courante puis

nous leurs affectons un à un de nouveaux chemins physiques en utilisant le mouvement « MoveFlot».

La liste Tabou est mise à jour avec les flots qui viennent d'être déplacés. L'amplificateur ne peut donc pas être recréé par un de ces flots pour un certain nombre d'itérations. Il peut par contre réapparaître si un tout autre flot requiert sa présence.

3.8.10 Évaluation d'une solution

L'objectif des heuristiques développées est de trouver une solution à coût minimal au problème GRWA. Il est donc nécessaire de calculer le coût d'une solution et d'évaluer sa qualité. L'évaluation d'une solution consiste à déterminer les valeurs de sa fonction objectif et de sa fonction d'évaluation. La fonction objectif nous indique le coût de la solution et la fonction d'évaluation nous informe sur sa qualité. Cette dernière nous permet d'explorer plus efficacement l'univers des solutions et nous informe sur leur réalisabilité. Elle nous permet aussi de différencier deux solutions qui ont la même valeur objective. Notons que tout au long de notre exploration de l'espace de solutions nous tenterons de minimiser les valeurs de la fonction objectif et de la fonction d'évaluation.

3.8.11 Fonction objectif

La fonction objectif permet le calcul du coût d'une solution.

Lorsque toutes les contraintes de la couche physique sont considérées la fonction objectif est la suivante :

$$F_{OBJ} = \text{coût des cartes de transport} + \text{coût de la compensation} + \text{coût de l'amplification} + \text{coût de la régénération } 3R.$$

Coût des cartes de transport

$$\text{Coût des cartes de transport} = (\text{nombre de cartes OC-48} \times \text{coût d'une carte OC-48}) + (\text{nombre de cartes OC-192} \times \text{coût d'une carte OC-192}).$$

La section 3.6.2 explique en détail le calcul du coût des cartes de transport. Les coûts des cartes OC-48 et OC-192 sont définis dans le tableau 3.2.

Coût de la compensation

$$\text{Coût de la compensation} = (\text{coût fixe}) + (\text{longueur du lien en km} \times \text{coût par km})$$

La section 3.7.1.3 explique en détail le calcul du coût de la compensation. Les coûts utilisés sont ceux définis au tableau 3.4.

Coût de l'amplification

$$\text{Coût de l'amplification} = \text{nombre d'amplificateurs optiques} \times \text{coût d'un amplificateur}$$

La section 3.7.2.2 explique en détail le calcul du coût de l'amplification. Le coût d'un amplificateur est défini au tableau 3.5.

Coût de la régénération 3R

$$\text{Coût de la régénération 3R.} = (\text{nombre de cartes 3R OC-48} \times \text{coût d'une carte OC-48}) + (\text{nombre de cartes 3R OC-192} \times \text{coût d'une carte OC-192}).$$

La section 3.7.3.2 explique en détail le calcul de la régénération 3R.

3.8.12 Fonction d'évaluation

La fonction d'évaluation tient compte d'un maximum d'informations pour choisir judicieusement une solution et évaluer sa qualité. Chaque fois qu'un mouvement est effectué ou comparé à un autre mouvement, c'est toujours la fonction d'évaluation qui est utilisée comme moyen de prise de décision.

La formulation de la fonction d'évaluation dépend des contraintes physiques considérées lors de la résolution du problème GRWA.

Lorsque toutes les contraintes de la couche physique sont considérées la fonction d'évaluation est la suivante :

$F_{EVAL} = \text{coût des cartes de transport} \times \text{ratio d'évaluation pour les cartes de transport} + \text{mesure corrective pour les cartes de transport} + \text{coût de la compensation} \times \text{ratio d'évaluation pour la compensation} + \text{mesure corrective pour la compensation} + \text{coût de l'amplification} \times \text{ratio d'évaluation pour l'amplification} + \text{mesure corrective pour l'amplification} + \text{coût des cartes 3R} \times \text{ratio d'évaluation pour les cartes 3R} + \text{mesure corrective pour les cartes 3R} + \text{mesure corrective pour la non réalisabilité.}$

Lorsque seulement un sous-ensemble de contraintes est considéré, les termes des autres contraintes sont tout simplement ignorés. Par exemple, si seul les contraintes de budget de puissance et de bruit optique sont considérées, tous les termes en relation avec la contrainte de dispersion chromatique sont ignorés et la fonction d'évaluation aura l'allure suivante :

$F_{EVAL} = \text{coût des cartes de transport} \times \text{ratio d'évaluation pour les cartes de transport} + \text{mesure corrective pour les cartes de transport} + \text{coût de l'amplification} \times \text{ratio d'évaluation pour l'amplification} + \text{mesure corrective pour l'amplification} + \text{coût des cartes 3R} \times \text{ratio d'évaluation pour les cartes 3R} + \text{mesure corrective pour les cartes 3R} + \text{mesure corrective pour la non réalisabilité.}$

Voici la signification des différents termes de la fonction d'évaluation :

- **Coût des cartes de transport** : C'est celui calculé par la fonction objectif.

$\text{Coût des cartes de transport} = (\text{nombre de cartes OC-48} \times \text{coût d'une carte OC-48}) + (\text{nombre de cartes OC-192} \times \text{coût d'une carte OC-192}).$

- **Ratio d'évaluation pour les cartes de transport** : C'est un paramètre qui permet de pondérer l'importance à accorder au coût des cartes lors du calcul de la fonction d'évaluation. Il vaut généralement 1.

- **Mesure corrective pour les cartes de transport** : C'est le résultat d'une formule qui permet de choisir entre deux solutions différentes dont le coût des cartes est identique. Elle tient compte du nombre de ports utilisés dans une solution.

La mesure corrective que nous appliquons ici est celle définie dans [8] par :

$$\text{Mesure corrective pour les cartes} = \left(\left(\frac{N_{OC-48} - U_{OC-48}}{N_{OC-48}} \times C_{OC-48} \right) + \left(\frac{N_{OC-192} - U_{OC-192}}{N_{OC-192}} \times C_{OC-192} \right) \right)$$

N_{OC-48} et N_{OC-192} = Le nombre de cartes OC-48 et OC-192 respectivement,

U_{OC-48} et U_{OC-192} = Le nombre de ports utilisés OC-48 et OC-192 respectivement,

C_{OC-48} et C_{OC-192} = Le coût d'une carte OC-48 et OC-192 respectivement.

Ainsi, pour deux solutions dont le coût des cartes est le même, c'est la solution qui possède le moins de ports inutilisés qui sera privilégiée.

- **Coût de la compensation** : C'est le même que celui calculé pour la fonction objectif.

$$\text{Coût de la compensation} = (\text{coût fixe}) + (\text{longueur du lien en km} \times \text{coût par km}).$$

- **Ratio d'évaluation pour la compensation** : C'est un paramètre qui vaut généralement 1. Il indique l'importance à accorder au coût de la compensation lorsque la solution est évaluée avec la fonction d'évaluation.
- **Mesure corrective pour la compensation** : C'est le résultat d'une formule qui permet de pondérer le choix entre deux solutions différentes dont le coût de la compensation est identique. La pondération tient compte du nombre de longueurs d'ondes qui sont à l'origine de la nécessité de compenser un lien. Par exemple, si nous avons deux liens à compenser et que nous sommes en présence des deux scénarios de compensation suivants, lequel des deux doit on privilégier ?

Scénario A : Lien 1 : 4 longueurs d'ondes compensées

Lien 2 : 4 longueurs d'ondes compensées

Scénario B : Lien 1 : 7 longueurs d'ondes compensées

Lien 2 : 1 longueurs d'ondes compensée

Dans les deux scénarios nous devons compenser 8 longueurs d'ondes, mais il faut privilégier le scénario B car sur le lien 1, la compensation est utile pour beaucoup plus de longueurs d'ondes que dans le scénario A alors que sur le lien 2, il sera relativement facile d'éliminer la compensation.

Voici la formule qui permet de calculer la mesure corrective pour la compensation [8]:

$$\text{Mesure corrective pour la compensation} = \sum_{\text{liens}} \left(\sqrt{\frac{W - N_{\text{lien}}^C}{W}} \times (L_{\text{lien}}^C \times C_{km}) + C_{\text{base}} \right)$$

N_{lien}^C = nombre de longueurs d'ondes à compenser pour le lien courant,

W = nombre total de longueurs d'ondes,

L_{lien}^C = longueur du lien,

C_{km} = coût de la compensation par kilomètre,

C_{base} = coût de base pour compenser un lien.

- **Coût de l'amplification:** C'est le même que celui calculé pour la fonction objectif.

Coût de l'amplification = nombre d'amplificateurs optique × coût d'un amplificateur

- **Ratio d'évaluation pour l'amplification :** C'est un paramètre qui vaut généralement 1. Il indique l'importance à accorder au coût de l'amplification lorsque la solution est évaluée avec la fonction d'évaluation.
- **Mesure corrective pour l'amplification :** C'est le résultat d'une formule qui permet de pondérer le choix entre deux solutions différentes dont le coût de l'amplification est

identique. Comme dans le cas de la compensation, la pondération tient compte du nombre de longueurs d'ondes qui sont à l'origine de la nécessité d'amplifier le signal optique traversant le lien et de la valeur moyenne de l'OSNR sur toutes ces longueurs d'ondes.

Voici la formule qui permet de calculer la mesure corrective pour l'amplification:

Mesure corrective pour l'amplification =

$$\sum_{\text{liens}} \left(\sqrt{\frac{W - N^{Amp}_{lien}}{W}} \times (NAmp_{lien} \times C_{Amp}) \times \frac{OSNR_{Min} - OSNR_{lien}}{OSNR_{Min}} \right)$$

N^{Amp}_{lien} = nombre de longueurs d'ondes à amplifier pour le lien courant,

$NAmp_{lien}$ = nombre d'amplificateurs installés sur le lien courant,

W = nombre total de longueurs d'ondes,

$OSNR_{Min}$ = OSNR Minimal à l'entrée de la carte de transport,

$OSNR_{Lien}$ = moyenne de l'OSNR pour le lien courant

C_{Amp} = coût de l'amplificateur

- **Coût des cartes 3R** : C'est celui calculé dans la fonction objectif.

Coût des cartes 3R = (le nombre de cartes 3R OC-48 × coût d'une carte OC-48) + (le nombre de cartes 3R OC-192 × coût d'une carte 3R OC-192).

- **Ratio d'évaluation pour les cartes 3R** : C'est un paramètre qui indique l'importance à accorder au coût des cartes 3R lors du calcul de la fonction d'évaluation. Il vaut généralement 1.
- **Mesure corrective pour les cartes 3R** : C'est le résultat d'une formule qui permet de choisir entre deux solutions différentes dont le coût des cartes 3R est identique. Elle

tient compte du nombre de longueurs d'ondes responsables de l'ajout des cartes 3R. La mesure corrective que nous appliquons ici est donc définie comme suit :

Mesure corrective pour les cartes 3R =

$$\sum_{\text{liens}} \left(\frac{N^{3R}_{\text{lien}}}{W} \times (N3R^{OC-48}_{\text{lien}} \times C_{OC-48} + N3R^{OC-192}_{\text{lien}} \times C_{OC-192}) \right)$$

$N3R_{\text{lien}}$ = nombre de longueurs d'ondes responsables de l'ajout d'une carte 3R sur le lien courant

$N3R^{OC-48}_{\text{lien}}$ = nombre de cartes 3R OC-48 du lien courant

$N3R^{OC-192}_{\text{lien}}$ = nombre de cartes 3R OC-192 du lien courant

W = nombre total de longueur d'onde

C_{OC-48} et C_{OC-192} = coût d'une carte OC-48 et OC-192 respectivement

- **Mesure corrective pour la non réalisabilité :** Elle se sépare en deux parties.

mesure corrective pour la non réalisabilité = (mesure corrective pour la violation de la contrainte de capacité + mesure corrective pour la violation de la contrainte de bruit optique) × ratio de validité

Si pour une solution, l'une des contraintes n'est pas respectée, alors la valeur de sa mesure corrective sera supérieure à 0 ce qui aura pour effet d'augmenter la valeur de la fonction d'évaluation et donc, par le fait même, rendre la solution étudiée moins intéressante.

- **Mesure corrective pour la violation de la contrainte de capacité**

mesure corrective pour la violation de la contrainte de capacité = (nombre de débordements de capacité répertorié à travers la solution × ratio pour le nombre de débordements) + (nombre de OC-1 qui déborde dans la solution × ratio pour le nombre de OC-1 qui déborde)

Le ratio pour le nombre de débordements et le ratio pour le nombre d'OC-1 qui débordent sont des paramètres du problème. Comme dans [8], nous leurs affectons généralement les valeurs 20 et 0,2 respectivement pour privilégier les solutions dont le débordement de capacité est plus localisé pour qu'il soit facile de les éliminer.

- **Mesure corrective pour la violation de la contrainte de bruit optique**

*mesure corrective pour la violation de la contrainte de bruit optique = nombre de longueurs d'ondes avec un OSNR insuffisant * ratio pour l'insuffisance de l'OSNR*

Le ratio pour l'insuffisance de l'OSNR permet de définir l'importance à accorder à ce type de violation de contraintes. En général, cette valeur est fixée à 10 [8].

Si la solution courante est réalisable, aucune mesure corrective de non réalisabilité ne doit être ajoutée; le total des mesures correctives de non réalisabilité sera nul. Dans le cas contraire, cette valeur sera multipliée par le *ratio de validité*.

- **Ratio de validité**

Il permet de contrôler dynamiquement l'importance à accorder à la non réalisabilité. Initialement, sa valeur vaut 1, il est ensuite augmenté graduellement après chaque itération passée dans le domaine non réalisable jusqu'à ce qu'il atteigne une limite maximale. Une fois la limite atteinte l'itération suivante indique qu'il faut impérativement redevenir réalisable. Au fur et à mesure que la solution courante redevient réalisable, le ratio de validité est diminué graduellement jusqu'à ce qu'il revienne à sa valeur initiale.

3.9 Approche d'exécution des heuristiques

Les deux heuristiques développées utilisent une approche qui consiste à explorer l'espace de solutions par région à l'aide de mouvements de diversifications et ensuite de concentrer la recherche d'optimum local à l'aide de mouvements d'intensifications.

Selon cette approche il convient donc de commencer par ordonner les nœuds et les liens selon certains critères pour guider notre exploration de manière à orienter les efforts vers les nœuds

et les liens où nous pensons qu'il y a le plus d'améliorations à apporter (réduire le nombre d'interruptions qui s'y produit, augmenter l'utilisation de la bande passante des ports, enlever la compensation, supprimer des amplificateurs dont le gain est faible etc.). Lorsque nous voulons converger vers un optimum local, on effectue des mouvements « MoveFlot » répétitifs sur le même nœud tant que les mouvements effectués ne détériorent pas la valeur objective de la solution et tant que nous trouvons au moins une amélioration de la valeur objective pour un certain nombre d'itérations consécutives.

3.9.1 Critère d'ordonnement des nœuds de l'heuristique Tabou séquentielle

Une fois la solution réseau initiale construite, nous analysons chacun de ses nœuds afin de déterminer pour chaque nœud le nombre de flots qui y transitent, le nombre de flots interrompus, la bande passante totale, la bande passante inutilisée et la bande passante utilisée par des interruptions. Nous ordonnons ensuite les nœuds selon le critère suivant:

Les nœuds dont la bande passante inutilisée + la bande passante utilisée par des interruptions est la plus grande sont mis en tête de liste des nœuds auxquels nous appliquerons la séquence des mouvements de diversification et d'intensification.

À la fin de l'exploration nous obtenons une solution réseau optimale dont nous construisons la couche physique selon les contraintes considérées.

3.9.2 Critères d'ordonnement des nœuds et des liens de l'heuristique Tabou simultanée

Une fois la solution réseau initiale construite, nous analysons chacun de ses nœuds afin de déterminer pour chaque nœud les mêmes statistiques que l'heuristique séquentielle. Puis nous construisons sa couche physique selon les contraintes considérées. Nous analysons ensuite la solution pour en extraire la liste de tous les liens compensés et la liste de tous les liens amplifiés. Pour chaque lien compensé nous énumérons tous les flots à l'origine de l'ajout de la compensation. Pour chaque lien amplifié nous énumérons tous les flots à l'origine de l'ajout de l'amplification puis nous évaluons le gain et l'OSNR à la sortie de chaque amplificateur

d'un lien amplifié. Pour chaque nœud nous comptons le nombre de cartes 3R qui y sont installées ainsi que les flots responsables des interruptions 3R. Nous ordonnons ensuite les liens selon les critères suivants :

Lorsque seule la compensation est considérée : Nous priorisons les liens par lesquels transitent le minimum de flots compensés.

Lorsque seule l'amplification est considérée : Nous priorisons les liens dont le gain d'amplification est le plus faible et par lequel transitent le plus petit nombre de flots amplifiés.

Lorsque les deux contraintes de compensation et d'amplification sont considérées : Nous priorisons les liens qui respectent le critère de la contrainte de compensation puis celui de l'amplification.

Lorsque la contrainte de bruit optique est considérée nous priorisons les liens qui respectent la contrainte de compensation puis ceux qui respectent le critère de la contrainte d'amplification. Nous priorisons ensuite les nœuds ayant un nombre minimal de flots responsables de l'ajout de carte 3R.

3.9.3 Modèle d'exécution des heuristiques Tabou

Comme indiqué précédemment, les deux heuristiques développées explorent l'espace de solutions par région à l'aide de mouvements de diversifications puis concentrent leur recherche d'optimum local à l'aide de mouvements d'intensifications.

Les mouvements de diversifications disponibles sont : « RemovePort », « Remove Compensation » et « RemoveAmplifier ».

Pour intensifier la recherche dans une région particulière de l'espace de solutions, nous utilisons le mouvement « Déplacer un flot ».

Concrètement, l'exploration de l'espace de solutions se fait à l'intérieur d'une boucle globale dont chaque itération correspond à l'exécution d'un mouvement.

Étant donné que le mouvement « MoveFlot» est le seul mouvement d'intensification dont on dispose et qu'il sera fréquemment appelé, nous avons défini deux variables *nombre_de_détériorations* et *nombre_de_stagnations* initialisées à 0 avant l'exécution du mouvement « MoveFlot». Lorsque l'exécution du mouvement n'améliore pas la fonction objectif les variables *nombre_de_détériorations* et *nombre_de_stagnations* sont incrémentées, si la fonction objectif demeure inchangée la variable *nombre_de_détériorations* est réinitialisée à 0 et la variable *nombre_de_stagnations* est incrémentées. Dans le cas où la fonction objectif se détériore les deux variables sont incrémentés. Lorsque les valeurs des deux variables atteignent un maximum nous exécutons alors un mouvement de diversification car nous avons probablement atteint un minimum local.

Chapitre 4 : Mise en œuvre des heuristiques Tabou multicouches de résolution du problème GRWA

Dans ce chapitre nous décrivons la mise en œuvre en C++ des deux heuristiques Tabou multicouches de résolution du problème GRWA : CLTABU_SEQ et CLTABU_SIM (*CrossLayer Tabu SEquential* et *CrossLayer Tabu SIMultaneous*). CLTABU_SEQ est une heuristique Tabou multicouche séquentielle de résolution du problème GRWA qui optimise la conception de la couche réseau du réseau optique WDM en premier pour ensuite construire sa couche physique. CLTABU_SIM est une heuristique Tabou qui optimise simultanément la conception des couches réseau et physique du réseau optique WDM.

Nous commençons par décrire l'architecture logicielle des deux heuristiques. Nous présentons les diagrammes de classes pour la modélisation d'un réseau optique et de sa demande de trafic. Nous décrivons les classes représentant les éléments du problème GRWA et de sa solution (les flots, les segments, les chemins optiques, les ports et les cartes de transports etc..). Nous présentons les structures de données pour la modélisation des éléments de la méta-heuristique Tabou tel que la liste Tabou, l'évaluation d'une solution, et les mouvements. Nous présentons ensuite la structure des fichiers de configuration en entrée des heuristiques. Ces derniers décrivent la topologie du réseau optique, la demande de trafic et les paramètres d'exécution des heuristiques. Finalement nous présentons les statistiques retournées par les deux heuristiques.

4.1 Architecture logicielle

Les deux heuristiques sont développées avec le langage orienté objet C++ sous Windows. L'architecture logicielle s'articule autour des classes suivantes:

Network : Elle permet la modélisation de la topologie du réseau optique en termes de nœuds, de liens et de chemins physiques.

Trafic: Elle est responsable de la modélisation de la demande de trafic en termes de requêtes entre les nœuds source et destination.

Solution : La classe solution est responsable de la conception des couches réseau et physique en termes de chemins optiques, de cartes de transport, de compensation, d'amplification et de régénération 3R.

Evaluation : Elle permet le calcul de la valeur objective et de la fonction d'évaluation.

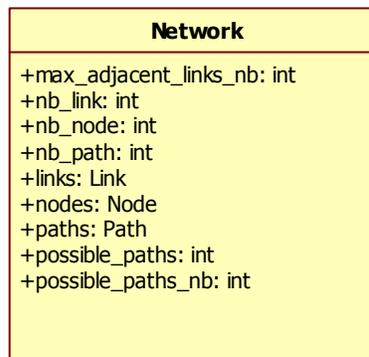
Problem : C'est la classe qui permet l'exploration de l'espace de solutions à l'aide de mouvements. Elle est composé des classes Solution et Evaluation et gère la liste Tabou.

Execution : Responsable du stockage des paramètres d'entrée des heuristiques.

Pour alléger la description des classes et des structures, nous avons présenté seulement leurs attributs. (cf. Annexe A pour plus de détails sur les méthodes)

4.1.1 Modélisation du réseau optique

Un réseau optique est modélisé à l'aide de la classe suivante :

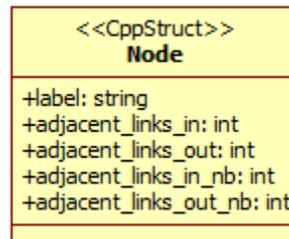


max_adjacent_links_nb : C'est le maximum des liens entrant et sortant de tous les nœuds du réseau
nb_link : Nombre de liens
nb_node : Nombre de noeuds
nb_path : Nombre de chemins
links : Tableau des liens
nodes : Tableau des noeuds

paths : Tableau des chemins
possible_paths : possible_paths[source][destination][numéro du chemin] = le numéro correspondant au chemin dans le tableau 'paths'

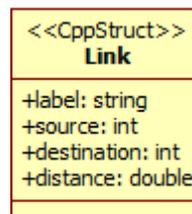
possible_paths_nb : possible_paths_nb[source][destination] = nombre de chemin avec cette source et cette destination

Un nœud est modélisé à l'aide de la structure suivante :



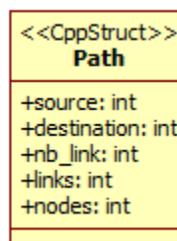
Label : Identificateur du Nœud
adjacent_links_in : Tableau des liens entrant au noeud
adjacent_links_out : Tableau des liens sortant du noeud
adjacent_links_in_nb : Nombre de liens entrant au nœud
adjacent_links_out_nb : Nombre de liens sortant du noeud

Un lien est modélisé à l'aide de la structure suivante :



Label : Identificateur du lien
Source : Noeud source du lien
Destination : Noeud destination du lien
Distance : Longueur du lien

Un chemin est modélisé à l'aide la structure suivante :

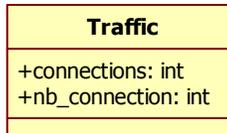


Source : Source du chemin
Destination : Destination du chemin

nb_link : Nombre de liens du chemin
links : Tableau des liens du chemin
nodes : Tableau des Noeuds du chemin

4.1.2 Modélisation du trafic

Le trafic est représenté à l'aide la classe suivante :

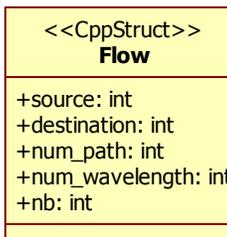


Connections : `connections[source][destination]` = le nombre de OC-1 qui vont de cette source à cette destination
nb_connection : Nombre total de connections

4.1.3 Modélisation des éléments de la métaheuristique Tabou

L'exploration de l'espace de solutions se fait à l'aide de la classe problem. Celle-ci est composée des classes Solution et Évaluation. (cf. Annexe A pour la définition des mouvements).

Une solution est entièrement définie par le groupage, le routage et l'affectation de longueurs d'ondes à l'ensemble des flots générés par la demande de trafic. Les mouvements d'intensifications et de diversifications que nous exécutons pour explorer l'espace de solution s'appliquent aux flots. De ce fait la structure « Flow » constitue la structure de données la plus élémentaire d'une solution. Elle est modélisée comme suit :



Source : Nœud source du flot
Destination : Nœud destination du flot
num_path : Numéro du chemin dans le tableau paths affecté au flot
num_wavelength : Numéro de longueur d'onde affecté au flot

nb : Nombre de OC-1 du flot

Problem
-network: Network -traffic: Traffic -begin_time: Time -current_time: Time -working_directory: char -nb_wavelength: int -nb_node: int -nb_link: int -tabu_list: TabuList -minimum_required_capacity: int -best_iteration: int -best_time: Time -best_solution: Solution -best_solution_eval: Evaluation -current_solution: Solution -current_solution_eval: Evaluation -previous_best_solution: Solution -iteration_excelsheet: ExcelSheet -nb_deterioration_realizable: int -nb_deterioration_irrealizable: int -nb_stagne_realizable: int -nb_stagne_irrealizable: int

Le rôle de la classe « Problem » est de contrôler l’exploration de l’espace de solution en exécutant une sequence de mouvements (itérations) sur des flots. Pour ce faire elle fait appel à la classe Solution qui modélise les éléments des couches réseau et physique. Elle fait aussi appel à la classe Evaluation pour le calcul des valeurs de la fonction d’évaluation et de la fonction objectif. Elle garde aussi une trace de la meilleure solution trouvée.

Network : Réseau optique
Traffic : Demande de trafic
begin_time, current_time : Heure de début d’exécution et heure courante
nb_wavelength : Nombre de longueur d’ondes
nb_node : Nombre de Nœuds du réseau
nb_link : Nombre de liens du réseau
tabu_list : Liste Tabou
best_iteration : Meilleur itération
Time best_time : Heure de la meilleure itération
best_solution : Meilleure solution
best_solution_eval : Meilleure évaluation
current_solution : Solution courante
current_solution_eval : Évaluation de la solution courante
previous_best_solution : Meilleure solution précédente
iteration_excelsheet : Fichie Excel contenant les statistiques des solutions
nb_deterioration_realizable : Nombre de détériorations dans le domaine réalisable

nb_deterioration_irrealizable : Nombre de détériorations dans le domaine irréalisable
nb_stagne_realizable : Nombre de stagnation dans le domaine réalisable
nb_stagne_irrealizable : Nombre de stagnation dans le domaine irréalisable

La liste Tabou est gérée par la classe suivante :

TabuList
-nb_element: int
-ptr: int
-list: Flow

nb_element : Nombre d'éléments dans la liste Tabou
Flow list[NB_MAX_TABU] : Tableau contenant les flots Tabou

L'évaluation d'une solution se fait à l'aide de la classe suivante:

Evaluation
-nb_node: int
-nb_link: int
-nb_wavelength: int
+validity_ratio: double
+total_port_card: TotalPortCard
+total_capacity: TotalCapacity
+total_interruption: TotalInterruption
+total_compensation: TotalCompensation
+total_amplification: TotalAmplification
+total_3r: Total3R
+total_osnr: TotalOSNR
+value_for_cards: double
+value_for_compensation: double
+value_for_amplification: double
+value_for_3r_cards: double
+objective_value: double
+corrective_measure_for_irrealizability: double
+corrective_measure_for_cards: double
+corrective_measure_for_compensation: double
+corrective_measure_for_amplification: double
+corrective_measure_for_3r_cards: double
+evaluation_value: double
+realizable: bool
+pl_realizable: bool

La classe « Evaluation » comptabilise toutes les statistiques nécessaires pour l'évaluation d'une solution : Le nombre de ports en entrée, le nombre de ports en sortie, le nombre de cartes de transports de nombre d'amplificateurs, le nombre de compensateurs de dispersion chromatique et le nombre de carte de transports 3R. Elle comptabilise aussi le nombre d'interruptions et le nombre de dépassements de capacité.

Notez que c'est au moment de l'évaluation d'une solution que l'on établit sa réalisabilité.

```
nb_node : Nombre de noeuds
nb_link : Nombre de liens
nb_wavelength : Nombre de longueur d'onde
validity_ratio : Ratio de validité
total_port_card : décompte du nombre de port et de carte de transport
TotalCapacity total_capacity : Informations sur les capacités
total_interruption : Informations sur le nombre d'interruption
total_compensation : Informations sur le nombre de compensateurs
total_amplification : Informations sur le nombre d'Amplificateurs
total_3r : Informations sur le nombre de 3r
total_osnr : Informations sur l'osnr
value_for_cards : Valeur objective de la partie qui compte les cartes
value_for_compensation : Valeur objective de la partie qui compte la
compensation
value_for_amplification : Valeur objective de la partie qui compte
l'amplification
value_for_3r_cards : Valeur objective de la partie qui compte les cartes 3r
objective_value : Valeur de la fonction objectif de la solution courante
corrective_measure_for_irrealizability : valeur de la correction qu'il faut
ajouter à 'value_for_compensation' pour obtenir la valeur de la fonction
d'évaluation si la solution est irréalisable
corrective_measure_for_cards : Valeur de la correction qu'il faut ajouter à
'value_for_cards' pour obtenir la valeur de la fonction d'évaluation
corrective_measure_for_compensation : Valeur de la correction qu'il faut
ajouter à 'value_for_compensation' pour obtenir la valeur de la fonction
d'évaluation
corrective_measure_for_amplification : Valeur de la correction qu'il faut
ajouter à 'value_for_amplification' pour obtenir la valeur de la fonction
d'évaluation

corrective_measure_for_3r_cards : Valeur de la correction qu'il faut
ajouter à 'value_for_3r_cards' pour obtenir la valeur de la fonction
d'évaluation
evaluation_value : Valeur de la fonction d'évaluation de la solution
courante
realizable : 'realizable' = 'false' si la solution courante est dans le
domaine irréalisable (c'est-à-dire si 'total_capacity.nb_over' > 0 ou si
'total_interruption.nb_over' > 0 ou si pl_realizable = false) sinon,
'realizable' = 'true'
pl_realizable : 'pl_realizable' = 'false' si la solution courante est
irréalisable physiquement (c'est-à-dire si 'OSNR > OSNRMIN )sinon,
'pl_realizable' = 'true'
```

4.1.4 Modélisation des éléments du problème GRWA

La solution du problème GRWA fait appel aux éléments présentés à la section 3.3 nous présentons dans ce qui suit leur implémentation en C++. Nous avons aussi introduit la notion d'occupation qui indique pour chaque demande de trafic, le chemin physique, le nombre de flots OC-1, la longueur d'onde qui lui a été affectée. Elle indique aussi le nombre

d'interruptions et leur emplacement dans le réseau (cf. Annexe A pour plus de détails sur la structure occupation)

La classe « Solution » modélise les détails d'une solution du problème GRWA elle est constituée des attributs suivants :

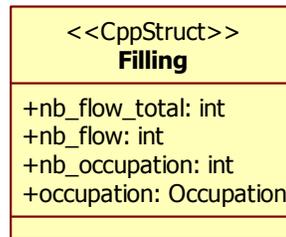
Solution
-network: Network -nb_wavelength: int +NA: Solution +NC: Solution +NCA: Solution +NAC: Solution +NAR: Solution +NCAR: Solution +NACR: Solution +NARC: Solution +traffic: Filling +link_wavelength_quantity: int +link_wavelength_capacity: int +track: int +compensation: Compensation +amplification: Amplification +fibre_power_budget: Fibre_power_budget +fibre_compensation: Fibre_compensation +fibre_PRE_AMP_osnr: Fibre_PRE_AMP_osnr +fibre_INLINE_AMP_osnr: Fibre_INLINE_AMP_osnr +fibre_INLINE_PRE_AMP_osnr: Fibre_INLINE_PRE_AMP_osnr +port_node: PortNode

Network : Réseau optique
nb_wavelength : Nombre de longueur d'ondes
NA : Solution avec amplification
NC : solution avec compensation
NCA : Solution avec amplification et compensation
NAC : Solution avec compensation et amplification
NAR : Solution avec amplification et régénération 3R
NCAR : Solution avec compensation, amplification et régénération 3R
NACR : Solution avec amplification, compensation et régénération 3R
NARC : Solution avec amplification, régénération 3R et compensation

Notez que chacune des solutions ci-dessus est une instance de la classe « Solution ».

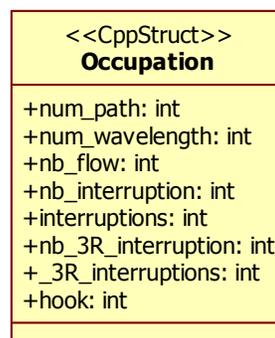
traffic : Tableau à deux dimensions de structure «Filling»

La structure « Filling » est modélisée comme suit :



nb_flow_total : nombre total de flot affecté à un chemin
nb_flow : nombre de flow qui n'ont pas encore été affecté à un chemin.

La structure « Filling » utilise la structure « Occupation » modélisée comme suit :



Nous décrivons dans ce qui suit les composants du tableau trafic pour faire le lien entre les structure «Filling » et Occupation ».

traffic[source][destination].nb_flow_total : Demande de trafic qui a cette source et cette destination

traffic[source][destination].nb_flow : Demande de trafic qui n'a pas encore été affectée à un chemin

traffic[source][destination].nb_occupation : nombre d'occupation (flots) qui ont cette source et cette destination

traffic[source][destination].occupation[i].num_path : Numéro du chemin dans le tableau « paths »

traffic[source][destination].occupation[i].num_wavelength : Numéro de la longueur d'onde du flot

traffic[source][destination].occupation[i].nb_flow : Nombre d'OC-1 du flot

`traffic[source][destination].occupation[i].nb_interruption` : Nombre d'interruption dans l'occupation

`traffic[source][destination].occupation[i].interruptions[j]` : '1' si il y a une interruption au noeud j pour cet occupation, '0' sinon

`traffic[source][destination].occupation[i].nb_3R_interruptions` : Nombre d'interruptions 3r dans l'occupation

`traffic[source][destination].occupation[i]._3R_interruptions[j]` : '1' s'il y a une interruption 3r au noeud j pour cet occupation, '0' sinon

notez qu'à tout moment :

`traffic[source][destination].nb_flow_total =`
`traffic[source][destination].nb_flow +`
`traffic[source][destination].occupation[all paths][all wavelength].nb`

`link_wavelength_quantity` : Tableau à deux dimensions qui indique pour chaque lien et pour chaque longueur d'onde la bande passante utilisée.
`link_wavelength_quantity[#link][#wavelength]` = bande passante utilisée sur ce lien/longueur d'onde

`link_wavelength_capacity` : Tableau à deux dimensions qui indique pour chaque lien et pour chaque longueur d'onde la capacité utilisée.
`link_wavelength_capacity[#link][#wavelength]` = (0, 1, 2 ou 3) faisant référence à (OC-0, OC-48, OC-192 ou > OC-192) pour ce lien et cette longueur d'onde

`track` : Tableau à quatre dimension utilisé pour faire le compte des ports dans pour un nœud donnée sur une longueur donnee donnée et pour ses liens adjacents entrant et sortant.

`track[#noeud][#longueur d'onde][#in_link][#out_link]` = 1 s'il y a une connection entre le lien adjacent entrant `#in_link` et le lien adjacent `#out_link` sortant sur la longueur d'onde `#longueur d'onde` dans le nœud `#noeud`, 0 sinon.

si `#in_link` ou `#out_link` = `adjacent_links_nb` ceci indique que ce lien est relié à un port de sortie ou d'entrée et que le noeud est soit un noeud destination ou un noeud source.

`Compensation` : Tableau à deux dimensions de structure « Compensation »

Elle est modélisée comme suit :

<<CppType>> Compensation
+state: int +length_before: double +length_after: double +next_fibre: int +prev_fibre: int +nb_carte: int +before: bool +after: bool +must_use_compensation: bool

compensation[#link][#longueur d'onde].state : indique l'état de la compensation pour un lien et une longueur d'onde données.
state = 0 si cette fibre/longueur d'onde n'appartient a aucun segment ayant besoin d'être compensé.

state = 1 si cette fibre/longueur d'onde doit être compensée que ce soit du OC-48 ou du OC-192

state = 2 si cette fibre/longueur d'onde appartient a un segment OC-192 ayant besoin d'être compensé mais si le débit changeait pour OC-48, alors aucune compensation ne serait nécessaire pour ce segment

state = -1 si cette fibre/longueur d'onde appartient a un segment OC-48 n'ayant pas besoin d'être compensé mais qui devrait être compensé si le débit venait à passer à OC-192

compensation[#link][#longueur d'onde].next_fibre : La fibre qui suit #link pour le segment dans cette longueur d'onde (-1 signifie que c'est la dernière fibre)

compensation[#link][#longueur d'onde].prev_fibre : La fibre qui précède #link pour le segment dans cette longueur d'onde (-1 signifie que c'est la première fibre)

compensation[#link][#longueur d'onde].nb_carte : Le nombre de carte qu'il faudrait ajouter (0, 1 ou 2) pour enlever la nécessité d'une compensation

compensation[#link][#longueur d'onde].after : 'true' si l'ajout d'une carte quelque part après le lien pourrait enlever la nécessité d'une compensation

compensation[#link][#longueur d'onde].before : 'true' si l'ajout d'une carte quelque part avant le lien pourrait enlever la nécessité d'une compensation

compensation[#link][#longueur d'onde].must_use_compensation : 'true' si on doit utiliser de la compensation peu importe les cartes qu'on ajoute notons ici que cela peut aussi survenir si on ne peut plus ajouter de carte parce que le nombre maximal d'interruption a été atteint pour ce segment

fibre_compensation : Tableau de structure « Fibre_compensation »

La structure « Fibre_compensation » indique pour chaque lien si un compensateur de dispersion chromatique doit y être installé.

Elle est modélisée comme suit :

<<CppStruct>> Fibre_compensation
+use_compensation: bool

fibre_compensation[#link].use_compensation : 'true' si un compensateur a été ajouter à la fibre #link, 'false' sinon

amplification : Tableau à deux dimensions de structure « Amplification »

La structure « Amplification » sert à stocker toute l'information nécessaire au calcul du budget de puissance d'un lien sur une longueur d'onde donnée. Noter qu'elle ne tient pas compte de l'amplification déjà existante sur le lien.

Elle est modélisée comme suit :

<<CppStruct>> Amplification
+must_use_amplification: bool +gain: double +next_fibre: int +prev_fibre: int +fibre_input_power: double +fibre_output_power: double +fibre_power_loss: double +fibre_ms: double

amplification[#link][#wavelength].must_use_amplification : 'true' si on doit amplifier le signal à l'extrémité du lien 'false' sinon

amplification[#link][#wavelength].gain : Gain total associé à longueur d'onde #wavelength sur le lien #link

amplification[#link][#wavelength].next_fibre : la fibre qui suit #link pour le segment dans cette longueur d'onde (-1 signifie que c'est la dernière fibre)

amplification[#link][#wavelength].prev_fibre : la fibre qui précède #link pour le segment dans cette longueur d'onde (-1 signifie que c'est la première fibre)

amplification[#link][#wavelength].fibre_power_loss : Perte de puissance subite par le signal

amplification[#link][#wavelength].fibre_ms : Marge de sécurité ajoutée à la perte de puissance subite par le signal

amplification[#link][#wavelength].fibre_input_power : Puissance à l'entrée de la fibre pour la longueur d'onde #wavelength

amplification[#link][#wavelength].fibre_output_power : Puissance à la sortie de la fibre pour la longueur d'onde #wavelength

fibre_power_budget : Tableau de structure « Fibre_power_budget »

La structure « Fibre_power_budget » permet de calculer le budget de puissance pour un lien donné sur toutes ses longueurs d'ondes.

Elle est modélisée comme suit :

<<CppType>> Fibre_power_budget
+power_loss: double
+ms: double
+gain: double
+number_of_amplifiers: int
+input_power: double
+output_power: double
+amplifier_gain: double

fibre_power_budget[#link].power_loss [#wavelength] : Atténuation du lien #link incluant La fibre, MUX/DMUX et DCU

fibre_power_budget[#link].ms[#wavelength] : marge de sécurité ajouté au power loss

fibre_power_budget[#link].gain : Gain total de l'amplification installée dans la fibre #link

fibre_power_budget[#link].input_power[#wavelength] : Puissance à l'entrée de la fibre #link pour la longueur d'onde #wavelength

fibre_power_budget[#link].output_power[#wavelength] : Puissance à la sortie de la fibre #link pour la longueur d'onde #wavelength

fibre_power_budget[#link].number_of_amplifiers : Nombre d'amplificateurs installé sur la fibre #link

fibre_PRE_AMP_osnr : Tableau de structure « Fibre_PRE_AMP_osnr »

La structure « Fibre_PRE_AMP_osnr » sert à garder toute l'information pour calculer la puissance du bruit optique ainsi que le rapport signal sur bruit (OSNR). Le calcul se fait pour chaque fibre optique et sur chacune de ses longueurs d'ondes lorsque la configuration PRE-AMP est utilisée.

Elle est modélisée comme suit :

<code><<CppType>></code> Fibre_PRE_AMP_osnr
<code>+input_signal_power: double</code> <code>+output_signal_power: double</code> <code>+input_noise_power: double</code> <code>+output_noise_power: double</code> <code>+input_osnr: double</code> <code>+output_osnr: double</code>

`fibre_PRE_AMP_osnr[#link].input_noise_power[#wavelength]` : La puissance du bruit de la longueur d'onde `#wavelength` à l'entrée du DMUX connecté à la fibre `#link`

`fibre_PRE_AMP_osnr[#link].output_noise_power[#wavelength]` : la puissance du bruit de la longueur d'onde `#wavelength` à la sortie du MUX connecté à la fibre (après pré-amplification)

`fibre_PRE_AMP_osnr[#link].input_osnr[#wavelength]` : L'osnr de la longueur d'onde `#wavelength` à l'entrée du DMUX de la fibre `#link`

`fibre_PRE_AMP_osnr[#link].output_osnr[#wavelength]` : L'osnr de la longueur d'onde `#wavelength` à la sortie du MUX connecté à la fibre `#link` (après pré-amplification)

`fibre_INLINE_AMP_osnr`: Tableau de structure «`Fibre_INLINE_AMP_osnr`»

Comme la structure La structure « `Fibre_PRE_AMP_osnr` », elle sert à garder toute l'information pour calculer la puissance du bruit optique ainsi que le rapport signal sur bruit (OSNR). Le calcul se fait aussi pour chaque fibre optique et sur chacune de ses longueurs d'ondes lorsque la configuration PRE-AMP est utilisée.

Elle est modélisée comme suit :

<code><<CppType>></code> Fibre_INLINE_AMP_osnr
<code>+input_signal_power: double</code> <code>+output_signal_power: double</code> <code>+input_noise_power: double</code> <code>+output_noise_power: double</code> <code>+input_osnr: double</code> <code>+output_osnr: double</code> <code>+amplifier_gain: double</code> <code>+amplifier_input_signal_power: double</code> <code>+amplifier_output_signal_power: double</code> <code>+amplifier_input_noise_power: double</code> <code>+amplifier_output_noise_power: double</code> <code>+amplifier_input_osnr: double</code> <code>+amplifier_output_osnr: double</code>

`fibre_INLINE_AMP_osnr[#link].input_noise_power[#wavelength]` : La puissance du bruit de la longueur d'onde `#wavelength` à l'entrée de la fibre `#link` en configuration `INLINE`

fibres_INLINE_AMP_osnr[#link].output_noise_power[#wavelength] : La puissance du bruit de la longueur d'onde #wavelength à la sortie de la fibre #link en configuration INLINE

fibres_INLINE_AMP_osnr[#link].input_osnr[#wavelength] : L'osnr de la longueur d'onde #wavelength à l'entrée de la fibre #link en configuration INLINE

fibres_INLINE_AMP_osnr[#link].output_osnr[#wavelength] : L'osnr de la longueur d'onde #wavelength à la sortie de la fibre #link en configuration INLINE

fibres_INLINE_AMP_osnr[#link].amplifier_gain[#amplifier] : Gain de l'amplificateur #Amplifier de la fibre #link, les amplificateurs sont ordonnés, 0 est le premier amplificateur 1 le second etc...

fibres_INLINE_AMP_osnr[#link].amplifier_input_signal_power[#amplifier][#wavelength] : La puissance de la longueur d'onde #wavelength à l'entrée de l'amplificateur #amplifier du lien #link

fibres_INLINE_AMP_osnr[#link].amplifier_output_signal_power[#amplifier][#wavelength] : La puissance de la longueur d'onde #wavelength à la sortie de l'amplificateur #amplifier du lien #link

fibres_INLINE_AMP_osnr[#link].amplifier_input_noise_power[#amplifier][#wavelength] : La puissance du bruit de la longueur d'onde #wavelength à l'entrée de l'amplificateur #amplifier du lien #link

fibres_INLINE_AMP_osnr[#link].amplifier_output_noise_power[#amplifier][#wavelength] : La puissance du bruit de la longueur d'onde #wavelength à la sortie de l'amplificateur #amplifier du lien #link

fibres_INLINE_AMP_osnr[#link].amplifier_input_osnr[#amplifier][#wavelength] : L'osnr à l'entrée de l'amplificateur #amplifier de la fibre #link

fibres_INLINE_AMP_osnr[#link].amplifier_output_osnr[#amplifier][#wavelength] : L'osnr à la sortie de l'amplificateur #amplifier de la fibre #link

fibres_INLINE_PRE_AMP_osnr: Tableau de structure «Fibre_INLINE_PRE_AMP_osnr»

La structure «Fibre_INLINE_PRE_AMP_osnr» sert à garder toute l'information pour calculer la puissance du bruit optique ainsi que le rapport signal sur bruit (OSNR). Le calcul se fait pour chaque fibre optique et sur chacune de ses longueurs d'ondes lorsque la configuration INLINE PRE-AMP est utilisée.

Elle est modélisée comme suit :

```
<<CppStruct>>
Fibre_INLINE_PRE_AMP_osnr
+input_signal_power: double
+output_signal_power: double
+input_noise_power: double
+output_noise_power: double
+input_osnr: double
+output_osnr: double
+amplifier_gain: double
+amplifier_input_signal_power: double
+amplifier_output_signal_power: double
+amplifier_input_noise_power: double
+amplifier_output_noise_power: double
+amplifier_input_osnr: double
+amplifier_output_osnr: double
```

`fibre_INLINE_PRE_AMP_osnr[#link].input_noise_power[#wavelength]` : La puissance du bruit de la longueur d'onde `#wavelength` à l'entrée de la fibre `#link` en configuration `INLINE PREAMP`

`fibre_INLINE_PRE_AMP_osnr[#link].output_noise_power[#wavelength]` : La puissance du bruit de la longueur d'onde `#wavelength` à la sortie de la fibre `#link` en configuration `INLINE PREAMP`

`fibre_INLINE_PRE_AMP_osnr[#link].input_osnr[#wavelength]` : L'osnr de la longueur d'onde `#wavelength` à l'entrée de la fibre `#link` en configuration `INLINE PREAMP`

`fibre_INLINE_PRE_AMP_osnr[#link].output_osnr[#wavelength]` : L'osnr de la longueur d'onde `#wavelength` à la sortie de la fibre `#link` en configuration `INLINE PREAMP`

`fibre_INLINE_PRE_AMP_osnr[#link].amplifier_gain[#amplifier]` : Gain de l'amplificateur `#Amplifier` de la fibre `#link`, les amplificateurs sont ordonné 0 est le premier amplificateur 1 le second etc...

`fibre_INLINE_PRE_AMP_osnr[#link].amplifier_input_signal_power[#amplifier][#wavelength]` : la puissance de la longueur d'onde `#wavelength` à l'entrée de l'amplificateur `#amplifier` du lien `#link`

`fibre_INLINE_PRE_AMP_osnr[#link].amplifier_output_signal_power[#amplifier][#wavelength]` : La puissance de la longueur d'onde `#wavelength` à la sortie de l'amplificateur `#amplifier` du lien `#link`

`fibre_INLINE_PRE_AMP_osnr[#link].amplifier_input_noise_power[#amplifier][#wavelength]` : La puissance du bruit de la longueur d'onde `#wavelength` à l'entrée de l'amplificateur `#amplifier` du lien `#link`

`fibre_INLINE_PRE_AMP_osnr[#link].amplifier_output_noise_power[#amplifier][#wavelength]` : La puissance du bruit de la longueur d'onde `#wavelength` à la sortie de l'amplificateur `#amplifier` du lien `#link`

`fibre_INLINE_PRE_AMP_osnr[#link].amplifier_input_osnr[#amplifier][#wavelength]` : L'osnr à l'entrée de l'amplificateur `#amplifier` de la fibre `#link`

`fibre_INLINE_PRE_AMP_osnr[#link].amplifier_output_osnr[#amplifier][#wavelength]` : L'osnr à la sortie de l'amplificateur `#amplifier` de la fibre `#link`

port_node : Tableau à deux dimensions de structure « PortNode »

La structure « PortNode » sert à garder toute l'information pour le calcul du nombre de ports et de cartes de transports.

Elle est modélisée comme suit :

<<CppType>> PortNode
+nb_port_in: int +nb_port_out: int +port_in: int +port_out: int +nb_port_in_3r: int +nb_port_out_3r: int +port_in_3r: int +port_out_3r: int

port_node[#node]->nb_port_in[#capacity {0 = OC-48, 1 = OC-192}] : Nombre de port en entrée de capacité #capacity au nœud #node

port_node[#node]->nb_port_out[#capacity {0 = OC-48, 1 = OC-192}] : Nombre de port en sortie de capacité #capacity au nœud #node

port_node[#node]->port_in[#wavelength][#in_link] : 1 si il faut placer un port (OC-48 ou OC-192) pour ce lien_in/longueur d'onde, 0 sinon

port_node[#node]->port_out[#wavelength][#out_link] : 1 si il faut placer un port (OC-48 ou OC-192) pour ce lien_out/longueur d'onde, 0 sinon

port_node[#node]->nb_port_in_3r[#capacity {0 = OC-48, 1 = OC-192}] : Nombre de port 3R en entrée de capacité #capacity au nœud #node

port_node[#node]->nb_port_out_3r[#capacity {0 = OC-48, 1 = OC-192}] : Nombre de port 3R en sortie de capacité #capacity au nœud #node

port_node[#node]->port_in_3r[#wavelength][#in_link] : 1 si il faut placer un port 3R (OC-48 ou OC-192) pour ce lien_in/longueur d'onde, 0 sinon

port_node[#node]->port_out_3r[#wavelength][#out_link] : 1 si il faut placer un port 3R (OC-48 ou OC-192) pour ce lien_out/longueur d'onde, 0 sinon

4.2 Fichiers de configuration en entrée des heuristiques

Les heuristiques prennent en entrée un fichier de configuration contenant entre autres le nom des fichiers qui décrivent la topologie du réseau optique et sa demande de trafic, les paramètres d'exécutions et les contraintes de la couche physique considérées. Voici un exemple de fichier de configuration pour une instance d'exécution NCAR.

```

[Input_Network_and_Traffic]

    Input_File = "ptp_80-80graph.txt"
    Input_File = "ptp_80-80traffic_oc-192.txt"

[EXECUTION]

#####
# Output Structure NCAR
#####

execution_name = "ptp_80-80_NCAR"
output_folder = "ptp_80-80_NCAR"
output_prefix = ""
output_mode = USE_FOLDER
output_evolution_file = TRUE
quiet_iteration = FALSE
random_seed = 0
milestone = 0

#####
# Constraints
#####

number_of_wavelength = 20
maximum_number_of_interruption = 40
compensation_thershold_OC_48 = 500.0
compensation_thershold_OC_192 = 80.0

#####
# Tabu parameters
#####

initial_solution_mode = GENERATE_INITIAL_SOLUTION

stopping_condition = MAXIMUM_NUMBER_OF_ITERATION
maximum_number_of_iteration = 100

number_of_element_in_tabu_list = 42
number_of_extra_length_for_considering_path = 3.2
maximum_number_of_deterioration = 1
maximum_number_of_stagnation = 4

#####
# Solution
#####

solution_type = NCAR
consider_physical_layer_constraint = AT_EACH_ITERATION
amplification_type = INLINE

#####
# Cost Function
#####

cost_for_OC_48_card = 4
cost_for_OC_192_card = 10

```

```

compensation_basic_cost = 1.0
compensation_km_cost = 0.375

cost_for_amplifier = 1

#####
# Evaluation Function
#####

evaluation_ratio_for_cards = 1
evaluation_ratio_for_3r_cards = 1
evaluation_ratio_for_compensation = 1
evaluation_ratio_for_amplification = 1

validity_ratio_minimum = 0.25
validity_ratio_maximum = 5
validity_ratio_increase_speed = 1.1
validity_ratio_decrease_speed = 0.85

evaluation_ratio_for_nb_capacity_overflow = 20
evaluation_ratio_for_capacity_overflow = 0.2
evaluation_ratio_for_insufficient_osnr = 10

```

Exemple de fichier de description de la topologie d'un réseau optique point à point:

```

[NODES]

node 1
node 2
node 3

[SYMLINKS]

[ASYMLINKS]
link 1 source 1 dest 2 length 80
link 2 source 2 dest 1 length 80
link 3 source 2 dest 3 length 80
link 4 source 3 dest 2 length 80

[WAVELENGTHS]
wavelengths 2
transport_signals oc48,oc192

```

Exemple de fichiers de description de la demande de trafic, nous produisons un fichier par granularité. Par exemple pour les granularités OC-1, OC-3 OC-12 et OC-48 la description du trafic est la suivante:

```

[TRAFFIC]
request 1 source 1 dest 2 count 2 bandwidth oc1
request 2 source 1 dest 3 count 1 bandwidth oc1

```

```
[TRAFFIC]
request 1 source 1 dest 2 count 5 bandwidth oc3
request 2 source 1 dest 3 count 8 bandwidth oc3

[TRAFFIC]
request 1 source 1 dest 2 count 2 bandwidth oc12
request 2 source 1 dest 3 count 3 bandwidth oc12

[TRAFFIC]
request 1 source 1 dest 2 count 1 bandwidth oc48
request 2 source 1 dest 3 count 1 bandwidth oc48
```

4.3 Fichiers résultant de l'exécution des heuristiques

Les heuristiques produisent plusieurs fichiers textes en sorties qui permettent de valider la pertinence de la solution produite. Ces fichiers sont volumineux pour être affichés dans le présent document, nous les avons utilisés surtout lors du développement pour détecter et corriger des anomalies dans le code source.

Pour évaluer la performance des deux heuristiques nous avons produit un fichier Excel qui permet de compiler les résultats de l'exécution des l'heuristiques à après l'exécution d'un mouvement.

Les résultats collectés sont :

- La valeur de la fonction objectif et de ses différentes composantes. Dépendamment des contraintes considérées on retrouve les valeurs des fonctions objectifs suivantes :
 - Fonction objectif des cartes de transport.
 - Fonction objectif de l'amplification
 - Fonction objectif de la compensation
 - Fonction objectif de la régénération 3R
- La valeur de la fonction d'évaluation et de ses différentes composantes. Dépendamment des contraintes considérées on retrouve les valeurs des fonctions d'évaluation suivantes :
 - Fonction d'évaluation des cartes de transport.
 - Fonction d'évaluation de l'amplification
 - Fonction d'évaluation de la compensation

-
- Fonction d'évaluation de la régénération 3R
 - Le nombre de port et de cartes de transport OC-48 et OC-192
 - Le nombre d'amplificateurs
 - Le nombre de compensateur de dispersion chromatique
 - Le nombre de régénérateur 3R

Chapitre 5 : Résultats et discussion

Dans ce chapitre nous décrivons les résultats obtenus lorsque nous exécutons les deux heuristiques CLTABU_SEQ (CrossLayer Tabu Sequential) et CLTABU_SIM (CrossLayer Tabu Simultaneous) sur le réseau NSFNET (*National Science Foundation Network*). Nous présentons les scénarios d'exploration de l'espace de solutions implémenté par les deux heuristiques. Puis nous comparons graphiquement les valeurs de leurs fonctions objectifs.

5.1 Scénario d'exploration de l'espace de solution

Nous avons testé 4 scénarios d'exploration de l'espace de solution définis dans [8] et nous avons retenu 1 seul qui permettait d'obtenir des coûts de conception multicouche simultanée meilleurs que celui de la conception multicouche séquentielle.

Dans le cas de l'heuristique séquentielle, nous exécutons le scénario d'exploration retenu pour l'optimisation de la couche réseau et lorsque le critère d'arrêt est rencontré nous construisons la couche physique en appelant la fonction `BuildPhysicalLayer (...)`.

La fonction `BuildPhysicalLayer (...)` a pour rôle d'évaluer le budget de puissance, la dispersion chromatique et l'OSNR de toute la solution et d'ajouter des amplificateurs, des compensateurs et des régénérateurs 3R lorsque nécessaire.

```
BuildPhysicalLayer(...)
{
Si (type de solution = NA ) BuildNA(...);
Si (type de solution = NC ) BuildNC(...);
Si (type de solution = NAC ) BuildNAC (...);
Si (type de solution = NCA ) BuildNCA (...);
Si (type de solution = NAR ) BuildNAR(...);
Si (type de solution = NACR ) BuildNACR(...);
Si (type de solution = NCAR ) BuildNCAR(...);
}
```

Dans le cas de l'heuristique simultanée, nous appelons la fonction `BuildPhysicalLayer (...)` pour construire la couche physique à la fin de l'exécution de chaque mouvement du scénario d'exploration retenu.

Le scénario retenu est présenté sous forme de pseudo code. Dans le but d'alléger l'écriture des algorithmes, lorsqu'il sera inscrit :

```
MoveFlot (...)
```

Il faudra toujours lire la procédure présentée ci-dessous qui met à jour le nombre de détérioration et le nombre de mouvements stagnants. Ce sont ces deux valeurs qui nous permettent de décider si nous devons intensifier notre exploration dans une régions donnée de l'espace de solution ou si nous devons nous déplacer dans une régions plus lointaine en exécutant un mouvement de diversification (voir section 3.8 pour la liste des mouvements d'intensification et de diversification Tabou disponibles).

```
nombre_de_détériorations ← 0
nombre_de_mouvements_stagnants ← 0
faire
  MoveFlot (...)
  Si la nouvelle solution est moins bonne que la précédente du point de vue
  de la fonction objectif
    nombre_de_détériorations ← nombre_de_détériorations + 1
    nombre_de_mouvements_stagnants ← nombre_de_mouvements_stagnants + 1
  Sinon, si la nouvelle solution est identique à la précédente du point de
  vue de la fonction objectif
    nombre_de_détériorations ← 0
    nombre_de_mouvements_stagnants ← nombre_de_mouvements_stagnants + 1
  Sinon
    nombre_de_détériorations ← 0
    nombre_de_mouvements_stagnants ← 0
tant que (nombres_de_détériorations < maximum_number_of_deterioration et
          nombres_de_mouvements_stagnants < maximum_number_of_stagnation)
```

Notons toutefois que cela est valable uniquement pour le mouvement `MoveFlot` lorsqu'il n'est pas utilisé pour déplacer une partie des connexions ou pour redevenir réalisable. Dans le cas où nous voulons utiliser le mouvement `MoveFlot` pour couper des connexions, nous utiliserons

le nom « MoveFlot-subset ». Lorsque nous voudrions redevenir réalisable nous indiquerons « MoveFlot-realizable » (voir section 3.8 pour la définition des mouvement MoveFlot - MoveFlot, MoveFlot-subset et MoveFlot-realizable).

Scénario retenu

```
Tant que le critère d'arrêt n'est pas rencontré
  Si le ratio de validité est au maximum
    Faire au maximum 10 fois
      MoveFlot-realizable ()
    Tant que nous sommes irréalisable
  Les noeuds sont ordonnés selon le critère.
  Si nous devons effectuer le premier petit scénario
    RemovePort (1er noeud de la liste)
    Pour i = 1 jusqu'à (nombre_de_noeud × 1/2)
      MoveFlot (ième noeud de la liste)
  Sinon, si nous devons effectuer le deuxième petit scénario
    RemovePort (1er noeud de la liste)
    MoveFlot-subset (2er noeud de la liste)
    RemovePort (3ème noeud de la liste)
    Pour i = 1 jusqu'à (nombre_de_noeud × 1/2)
      MoveFlot (ième noeud de la liste)
  Sinon, c'est que nous devons effectuer le troisième petit scénario
    MoveFlot-subset (1er noeud de la liste)
    Pour i = 1 jusqu'à (nombre_de_noeud × 1/2)
      MoveFlot ((i+1)ème noeud de la liste)
```

5.2 Le Réseau NSFNET

Pour tester les heuristiques développées, nous avons opté pour le réseau NSFNET inspiré d'un réseau aux États-Unis qui relie les principales villes américaines. La figure 5.1 illustre ce réseau.

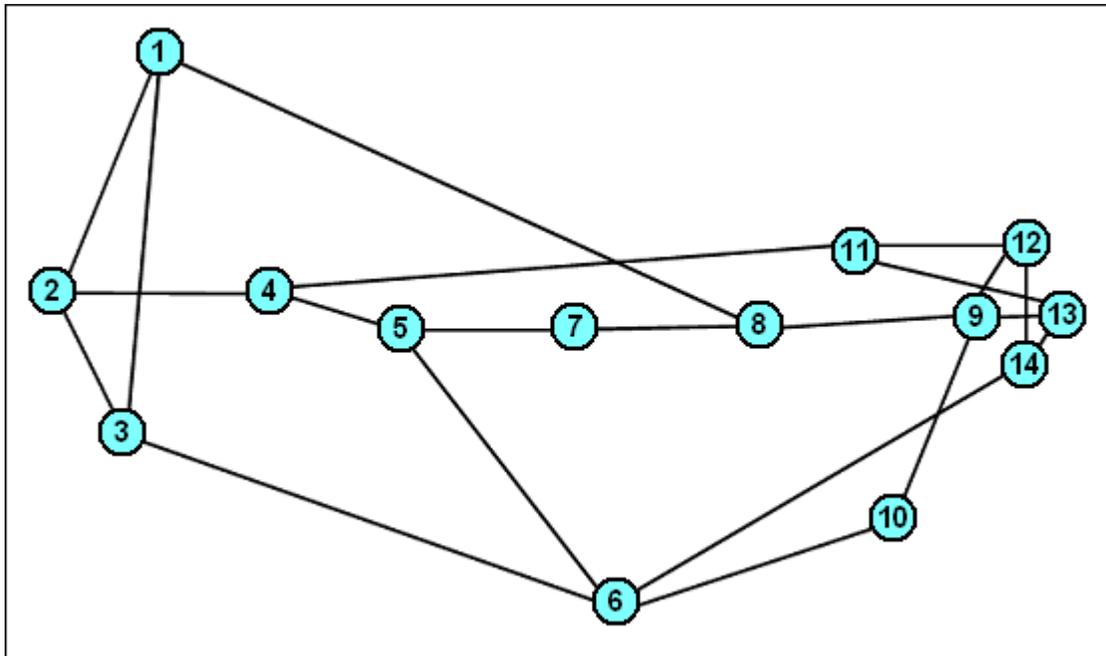


Figure 5.1 : Le réseau NSF

Pour cette instance, nous avons généré aléatoirement le trafic suivant :

Pour chaque paire de nœud possible, nous avons tiré au hasard la bande passante demandée de cette façon :

nombre de requête OC-1 = une valeur aléatoire parmi {0, 1, 2, 3}

nombre de requête OC-3 = une valeur aléatoire parmi {0, 1, 2, 3}

nombre de requête OC-12 = une valeur aléatoire parmi {0, 1, 2, 3, 4, 5, 6}

nombre de requête OC-48 = une valeur aléatoire parmi {0, 1, 2, 3, 4, 5, 6}

5.3 Résultats d'exécution des heuristiques CLTABU_SEQ et CLTABU_SIM

5.3.1 Paramètres d'exécution

En se basant sur l'étude faite dans [8] nous avons considéré les paramètres d'exécution suivants :

- Paramètres de la métaheuristique Tabou

number_of_element_in_tabu_list = 42
number_of_extra_length_for_considering_path = 3.2
maximum_number_of_deterioration = 1
maximum_number_of_stagnation = 4
validity_ratio_minimum = 0.25
validity_ratio_maximum = 5
validity_ratio_increase_speed = 1.5
validity_ratio_decrease_speed = 0.85

- Paramètres de la fonction d'évaluation

evaluation_ratio_for_cards = 1
evaluation_ratio_for_3r_cards = 1
evaluation_ratio_for_compensation = 1
evaluation_ratio_for_amplification = 1
evaluation_ratio_for_nb_capacity_overflow = 10
evaluation_ratio_for_capacity_overflow = 0.2

- Paramètres du problème GRWA

Voici le nombre de longueurs d'ondes que nous avons utilisé pour chacune des solutions multicouches considérées.

number_of_wavelength = 20 pour NSF NA, NSF NC et NSF NCA
number_of_wavelength = 25 pour NSF NAR, NSF NCAR

- Contrainte de dispersion chromatique

Nous avons utilisé les mêmes paramètres que [8]

compensation_threshold_OC_48 = 500.0 km

compensation_thershold_OC_192 = 80.0 km

Nous avons utilisé les spécifications du MSPP ONS SONET 15454 et de la fibre optique monomode G-652 pour fixer les paramètres de budget de puissance et de bruit optique [1][15].

- *Contrainte de budget de puissance*

Coefficient d'atténuation de la fibre : FBR_ATT = 0.2 dB/Km

Puissance minimale à la sortie de la carte de transport : TC_PTX_MIN = 5 dBm

Puissance maximale à la sortie de la carte de transport pour ne pas avoir d'effet non linéaire : TC_PTX_MAX = 5 dBm

Puissance minimale à l'entrée de la carte transport : TC_PRX_MIN = - 20 dBm

Puissance maximale à l'entrée de la carte transport pour ne pas avoir d'effet non linéaire : TC_PRX_MAX = -3 dBm

Marge de sécurité : MS = 2 dB

Perte d'insertion du compensateur de dispersion chromatique : DCU_IL = 7 dB

Pertes d'insertion du multiplexeur : MUX_IL = 9 dB

Pertes d'insertion du démultiplexeur : DMUX_IL = 9 dB

Gain maximal de l'amplificateur : AMP_GAIN_MAX = 20 dB

Gain minimal de l'amplificateur : AMP_GAIN_MIN = 5 dB

- *Contrainte de bruit optique*

OSNR Minimal à l'entrée de la carte de transport : TC_OSNR_RX_MIN= 30

OSNR Maximal à l'entrée de la carte de transport : TC_OSNR_RX_MAX= 1E03

Facteur de bruit de l'amplificateur : AMP_NF = 4.0

Bande passante pour la mesure du facteur de bruit correspondant à une ouverture fréquentiel de 0.1nm : NF_BANDWIDTH = 12.5E+9

Constante de Planck : PLANCK_CONSTANTE = 6.6260E-34

Fréquence de la lumière à 1550 LIGHT_FREQUENCY = 1.9350E+14

-*Paramètres de la fonction de coût*

cost_for_OC_48_card = 4 K\$

cost_for_OC_192_card = 10 K\$

compensation_basic_cost = 1.0 K\$

compensation_km_cost = 0.375 K\$/km

cost_for_amplifier = 1 .0 K\$

5.3.2 Résultats

Nous avons exécuté les deux heuristiques Tabou séquentiel et simultané sur le réseau NSF avec la même demande de trafic et selon le scénario décrit à la section 5.1.

Selon la hiérarchie des solutions de la figure 3.16 nous considérons les solutions suivantes :

- NSF NA : Solution où l'on considère la contrainte le budget de puissance seulement, ce qui implique l'ajout d'amplificateurs optiques.
- NSF NCA : Solution où l'on considère les contraintes de dispersion chromatique et de budget de puissance, ce qui implique l'ajout de compensateurs de dispersion chromatique et d'amplificateurs optiques.
- NSF NAR : Solution où l'on considère les contraintes de budget de puissance et de bruit optique, ce qui implique l'ajout d'amplificateurs optiques et de régénérateur 3R.
- NSF NCAR : Solution où l'on considère les contraintes de dispersion chromatique, de budget de puissance et de bruit optique ce qui implique l'ajout d'amplificateurs optiques, de compensateurs de dispersion chromatique et de régénérateurs 3R.

Pour chacune des solutions précitées, nous multiplions la valeur de la fonction objectif par la réalisabilité qui prend 0 lorsque la solution est irréalisable et 1 lorsqu'elle est réalisable. Ceci nous permet d'annuler les coûts des solutions irréalisables pour ne garder que les coûts des solutions réalisables.

5.3.2.1 Solution NSF NA

La solution NSF NA optimise la conception d'un réseau optique WDM en ne tenant compte que de la contrainte de budget de puissance seulement.

Voici les valeurs de la fonction objectif multipliée par la réalisabilité pour 100 itérations figure 5.2. Nous remarquons une différence entre la valeur minimale MIN SIM de la fonction objectif de l'heuristique d'optimisation simultanée du réseau NSF (2503 k\$) et celle de l'optimisation séquentielle MIN SEQ (2532 K\$), soit une différence de 29 k\$. Ceci démontre que la l'optimisation simultanée du réseau optique NSF dans le cas où l'on ne considère que la

contrainte de budget de puissance nécessite moins d'équipements que l'optimisation séquentielle.

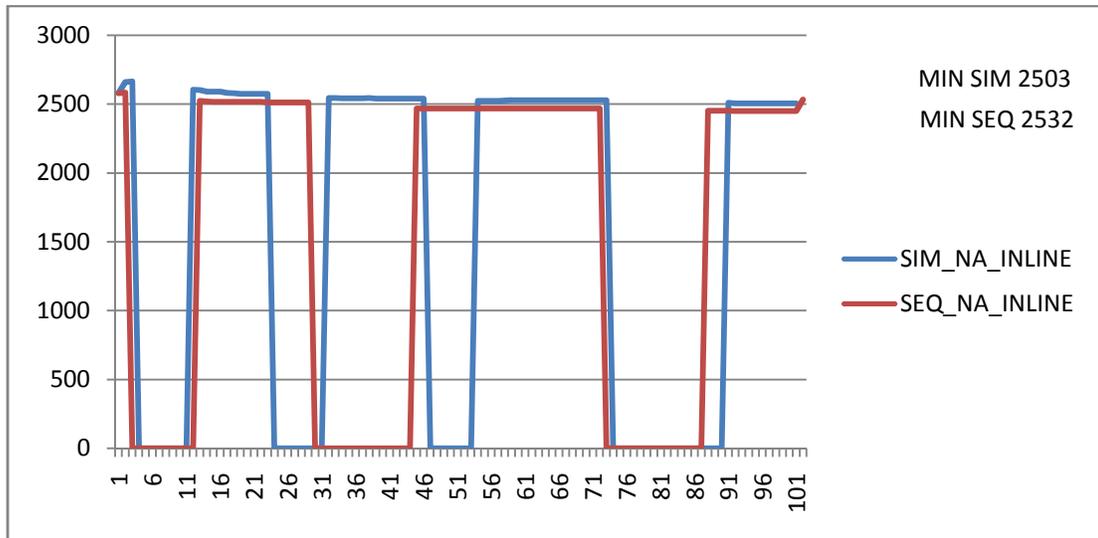


Figure 5.2 : Valeur de la fonction objectif multipliée par la réalisabilité de la solution NSF NA

Statistiques de la meilleure solution NSF NA issue de l'optimisation simultanée

```

Statistics and Evaluation for the current best solution
=====
100 iterations done (including the initial iteration) within 97 sec.
The best solution was found at iteration 91 after 80 sec.

Capacity Statistics
-----
Overall STS-0 used capacity : 331
Overall STS-48 used capacity : 22
Overall STS-192 used capacity : 487
Over max (STS-192) used capacity : 0
Overall network available capacity : 94560
Overall network used capacity : 77367
Overall network occupation : 81.8179 %

Transport card Statistics
-----
OC-48 : Total of 16 transport cards needed
    
```

OC-192 : Total of 236 transport cards needed

OC-48 : Total of 6 port wasted

OC-192 : Total of 10 port wasted

Amplification Statistics

Total number of amplifiers needed = 79

Cost function

Cost of Network Solution : 2424.0000

Cost of Transport Cards : 2424.0000

Cost of 3r Cards: 0.0000

Cost of Amplifiers : 79.0000

Cost of compensation : 0.0000

Overall Cost : **2503.0000**

Evaluation function

Network Solution Cost: 2424.0000

Weight of Network Solution: 1.0000

Corrective measure for cards: 12.0763

Evaluation of Network solution : 2436.0763

Compensation Solution Cost: 0.0000

Weight of Compensation Solution : 1.0000

Corrective_measure_for_Compensation: 0.0000

Evaluation of Compensation solution : 0.0000

Amplification Solution Cost: 79.0000

Weight of Amplification Solution : 1.0000

Corrective_measure_for_Amplification: 8.5066

Evaluation of Amplification solution : 80.2760

3R Solution Cost: 0.0000

Weight of 3R Solution : 1.0000

Corrective_measure_for_3r_cards: 0.0000

Evaluation of 3R solution : 0.0000

Corrective_measure_for_irrealizability : 0.0000

Validity ratio : 0.8367

Evaluation function : 2516.3523

PL Realizability : TRUE #
#####

Realizability : TRUE #
#####

Statistiques de la meilleure solution NSF NA issue de l'optimisation séquentielle

Statistics and Evaluation for the current best solution

=====
101 iterations done (including the initial iteration) within 73 sec.
The best solution was found at iteration 91 after 65 sec.

Capacity Statistics

Overall STS-0 used capacity : 319
Overall STS-48 used capacity : 35
Overall STS-192 used capacity : 486
Over max (STS-192) used capacity : 0
Overall network available capacity : 94992
Overall network used capacity : 76976
Overall network occupation : 81.0342 %

Transport card Statistics

OC-48 : Total of 25 transport cards needed
OC-192 : Total of 235 transport cards needed
OC-48 : Total of 6 port wasted
OC-192 : Total of 12 port wasted

Amplification Statistics

Total number of amplifiers needed = 82

```

Cost function
-----
Cost of Network Solution : 2450.0000
Cost of Transport Cards : 2450.0000
Cost of 3r Cards: 0.0000
Cost of Amplifiers : 82.0000
Cost of compensation : 0.0000
-----
Overall Cost : 2532.0000

Evaluation function
-----
Network Solution Cost: 2450.0000
Weight of Network Solution: 1.0000
Corrective measure for cards: 12.5294
Evaluation of Network solution : 2462.5294

Compensation Solution Cost: 0.0000
Weight of Compensation Solution : 1.0000
Corrective_measure_for_Compensation: 0.0000
Evaluation of Compensation solution : 0.0000

Amplification Solution Cost: 82.0000
Weight of Amplification Solution : 1.0000
Corrective_measure_for_Amplification: 8.9198
Evaluation of Amplification solution : 83.3380

3R Solution Cost: 0.0000
Weight of 3R Solution : 1.0000
Corrective_measure_for_3r_cards: 0.0000
Evaluation of 3R solution : 0.0000

Corrective_measure_for_irrealizability : 0.0000
Validity ratio : 0.4368

-----
Evaluation function : 2545.8673

#####

```

```

# PL Realizability : TRUE #
#####

#####
# Realizability : TRUE #
#####

```

5.3.2.2 Solution NSF NC

La solution NSF NC optimise le coût de la conception d'un réseau optique WDM en considérant la contrainte de dispersion chromatique seulement.

Voici les valeurs de la fonction objectif multipliée par la réalisabilité pour 200 itérations figure 5.3. Nous remarquons une différence entre la valeur minimale MIN SIM de la fonction objectif de l'heuristique d'optimisation simultanée du réseau NSF (2948.625 k\$) et celle de l'optimisation séquentielle MIN SEQ (2961K\$), soit une différence de 12.375 k\$. Ceci démontre que la l'optimisation simultanée du réseau optique NSF dans le cas où l'on ne considère que la contrainte de dispersion chromatique nécessite moins d'équipements que l'optimisation séquentielle.

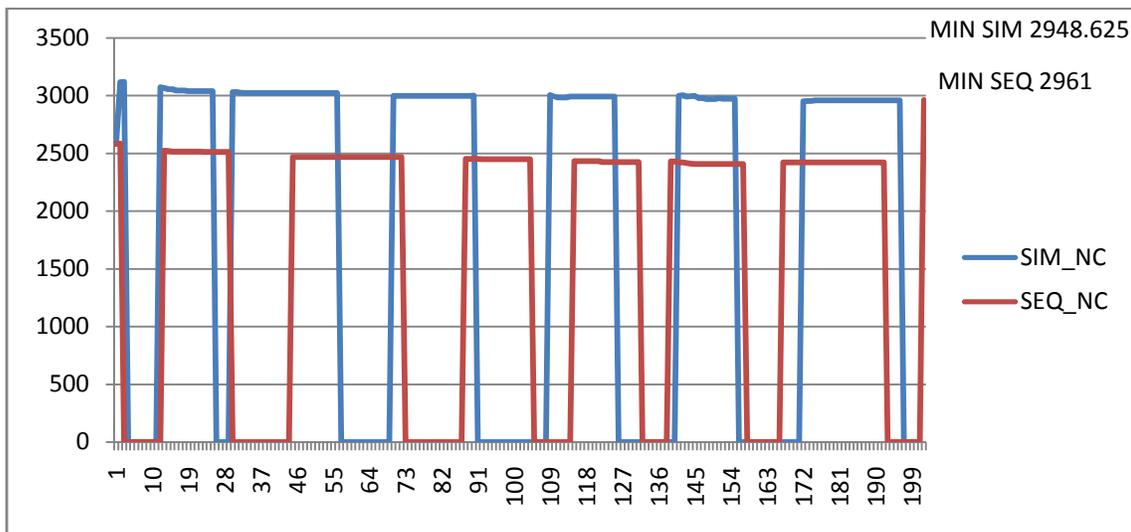


Figure 5.3 : Valeur de la fonction objectif multipliée par la réalisabilité de la solution NSF NC

Statistiques de la meilleure solution NSF NC issue de l'optimisation simultanée

Statistics and Evaluation for the current best solution

=====

200 iterations done (including the initial iteration) within 198 sec.

The best solution was found at iteration 171 after 178 sec.

Capacity Statistics

Overall STS-0 used capacity : 308

Overall STS-48 used capacity : 46

Overall STS-192 used capacity : 486

Over max (STS-192) used capacity : 0

Overall network available capacity : 95520

Overall network used capacity : 78717

Overall network occupation : 82.4089 %

Transport card Statistics

OC-48 : Total of 23 transport cards needed

OC-192 : Total of 234 transport cards needed

OC-48 : Total of 4 port wasted

OC-192 : Total of 12 port wasted

Amplification Statistics

Total number of amplifiers needed = 0

Cost function

Cost of Network Solution : 2432.0000

Cost of Transport Cards : 2432.0000

Cost of 3r Cards: 0.0000

Cost of Amplifiers : 0.0000

Cost of compensation : 516.6250

Overall Cost : **2948.6250**

Evaluation function

```

Network Solution Cost: 2432.0000
Weight of Network Solution: 1.0000
Corrective measure for cards: 12.7915
Weight of corrective measure for cards: 1.0000
Evaluation of Network solution : 2444.7915

Compensation Solution Cost: 516.6250
Weight of Compensation Solution : 1.0000
Corrective_measure_for_Compensation: 62.9579
Evaluation of Compensation solution : 526.0687

Amplification Solution Cost: 0.0000
Weight of Amplification Solution : 1.0000
Corrective_measure_for_Amplification: 0.0000
Evaluation of Amplification solution : 0.0000

3R Solution Cost: 0.0000
Weight of 3R Solution : 1.0000
Corrective_measure_for_3r_cards: 0.0000
Evaluation of 3R solution : 0.0000
Corrective_measure_for_irrealizability : 0.0000
Validity ratio : 1.8984

```

```

-----
Evaluation function : 2970.8602

```

```

#####
# PL Realizability : TRUE #
#####

```

```

#####
# Realizability : TRUE #
#####

```

Statistiques de la meilleure solution NSF NC issue de l'optimisation séquentielle

```

Statistics and Evaluation for the current best solution
=====
201 iterations done (including the initial iteration) within 195 sec.
The best solution was found at iteration 144 after 126 sec.
Capacity Statistics

```

Overall STS-0 used capacity : 311
Overall STS-48 used capacity : 32
Overall STS-192 used capacity : 497
Over max (STS-192) used capacity : 0
Overall network available capacity : 96960
Overall network used capacity : 79565
Overall network occupation : 82.0596 %

Transport card Statistics

OC-48 : Total of 19 transport cards needed
OC-192 : Total of 233 transport cards needed
OC-48 : Total of 2 port wasted
OC-192 : Total of 10 port wasted

Amplification Statistics

Total number of amplifiers needed = 0

Cost function

Cost of Network Solution : 2406.0000
Cost of Transport Cards : 2406.0000
Cost of 3r Cards: 0.0000
Cost of Amplifiers : 0.0000
Cost of compensation : 555.0000

Overall Cost : **2961.0000**

Evaluation function

Network Solution Cost: 2406.0000
Weight of Network Solution: 1.0000
Corrective measure for cards: 13.1498
Weight of corrective measure for cards: 1.0000
Evaluation of Network solution : 2419.1498

Compensation Solution Cost: 555.0000

```

Weight of Compensation Solution : 1.0000
Corrective_measure_for_Compensation: 62.4386
Evaluation of Compensation solution : 564.3658

Amplification Solution Cost: 0.0000
Weight of Amplification Solution : 1.0000
Corrective_measure_for_Amplification: 0.0000
Evaluation of Amplification solution : 0.0000

3R Solution Cost: 0.0000
Weight of 3R Solution : 1.0000
Corrective_measure_for_3r_cards: 0.0000
Evaluation of 3R solution : 0.0000

Corrective_measure_for_irrealizability : 0.0000
Validity ratio : 4.2500

```

```

-----
Evaluation function : 2983.5156

```

```

#####
# PL Realizability : TRUE #
#####

```

```

#####
# Realizability : TRUE #
#####

```

5.3.2.3 Solution NSF NCA

La solution NSF NCA optimise le coût de la conception d'un réseau optique WDM en considérant les contraintes de dispersion chromatique et le budget de puissance.

Voici les valeurs de la fonction objectif multipliée par la réalisabilité pour 100 itérations figure 5.4. Nous remarquons une différence entre la valeur minimale MIN SIM de la fonction objectif de l'heuristique d'optimisation simultanée du réseau NSF (3059.125 k\$) et celle de l'optimisation séquentielle MIN SEQ (3078.625 K\$), soit une différence de 19.5 k\$. Ceci démontre que la l'optimisation simultanée du réseau optique NSF dans le cas où l'on

considère les contraintes de dispersion chromatique et de budget de puissance nécessite moins d'équipements que l'optimisation séquentielle.

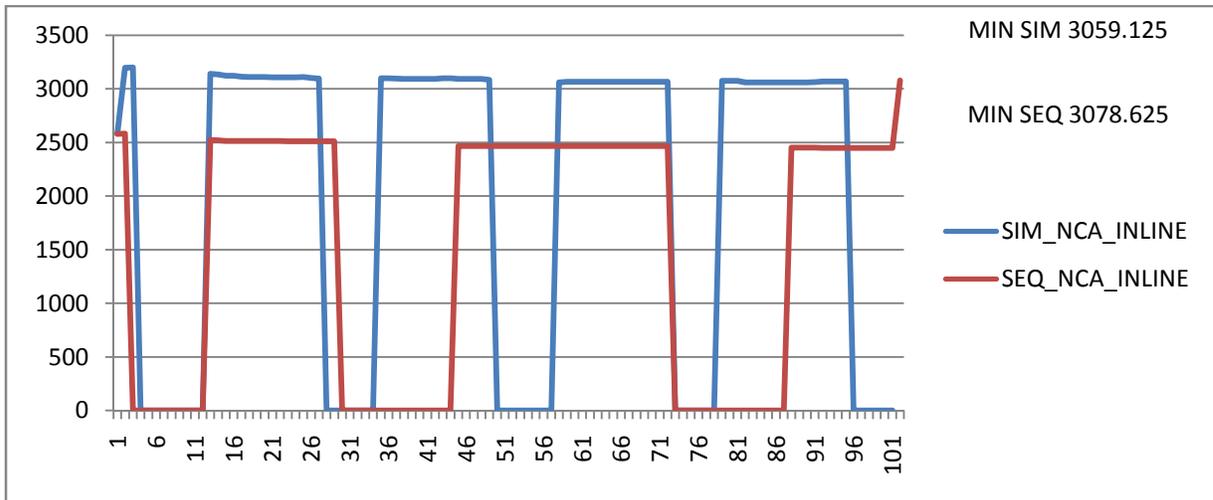


Figure 5.4 : Valeur de la fonction objectif multipliée par la réalisabilité de la solution NSF NCA

Statistiques de la meilleure solution NSF NCA issue de l'optimisation simultanée

```

Statistics and Evaluation for the current best solution
=====
100 iterations done (including the initial iteration) within 99 sec.
The best solution was found at iteration 57 after 66 sec.

Capacity Statistics
-----
Overall STS-0 used capacity : 329
Overall STS-48 used capacity : 29
Overall STS-192 used capacity : 482
Over max (STS-192) used capacity : 0
Overall network available capacity : 93936
Overall network used capacity : 75810
Overall network occupation : 80.7039 %

Transport card Statistics
-----
OC-48 : Total of 18 transport cards needed
    
```

OC-192 : Total of 238 transport cards needed
OC-48 : Total of 4 port wasted
OC-192 : Total of 12 port wasted

Amplification Statistics

Total number of amplifiers needed = 81

Cost function

Cost of Network Solution : 2452.0000
Cost of Transport Cards : 2452.0000
Cost of 3r Cards: 0.0000
Cost of Amplifiers : 81.0000
Cost of compensation : 526.1250

Overall Cost : **3059.1250**

Evaluation function

Network Solution Cost: 2452.0000
Weight of Network Solution: 1.0000
Corrective measure for cards: 12.6069
Weight of corrective measure for cards: 1.0000
Evaluation of Network solution : 2464.6069

Compensation Solution Cost: 526.1250
Weight of Compensation Solution : 1.0000
Corrective_measure_for_Compensation: 62.5875
Evaluation of Compensation solution : 535.5131

Amplification Solution Cost: 81.0000
Weight of Amplification Solution : 1.0000
Corrective_measure_for_Amplification: 8.6259
Evaluation of Amplification solution : 82.2939

3R Solution Cost: 0.0000
Weight of 3R Solution : 1.0000
Corrective_measure_for_3r_cards: 0.0000
Evaluation of 3R solution : 0.0000

```
Corrective_measure_for_irrealizability : 0.0000
```

```
Validity ratio : 3.5766
```

```
-----
```

```
Evaluation function : 3082.4139
```

```
#####
```

```
# PL Realizability : TRUE #
```

```
#####
```

```
#####
```

```
# Realizability : TRUE #
```

```
#####
```

Statistiques de la meilleure solution NSF NCA issue de l'optimisation séquentielle

```
Statistics and Evaluation for the current best solution
```

```
=====
```

```
101 iterations done (including the initial iteration) within 74 sec.
```

```
The best solution was found at iteration 91 after 65 sec.
```

```
Capacity Statistics
```

```
-----
```

```
Overall STS-0 used capacity : 319
```

```
Overall STS-48 used capacity : 35
```

```
Overall STS-192 used capacity : 486
```

```
Over max (STS-192) used capacity : 0
```

```
Overall network available capacity : 94992
```

```
Overall network used capacity : 76976
```

```
Overall network occupation : 81.0342 %
```

```
Transport card Statistics
```

```
-----
```

```
OC-48 : Total of 25 transport cards needed
```

```
OC-192 : Total of 235 transport cards needed
```

```
OC-48 : Total of 6 port wasted
```

```
OC-192 : Total of 12 port wasted
```

```
Amplification Statistics
```

```
-----
```

Total number of amplifiers needed = 84

Cost function

Cost of Network Solution : 2450.0000

Cost of Transport Cards : 2450.0000

Cost of 3r Cards: 0.0000

Cost of Amplifiers : 84.0000

Cost of compensation : 544.6250

Overall Cost : **3078.6250**

Evaluation function

Network Solution Cost: 2450.0000

Weight of Network Solution: 1.0000

Corrective measure for cards: 12.5294

Weight of corrective measure for cards: 1.0000

Evaluation of Network solution : 2462.5294

Compensation Solution Cost: 544.6250

Weight of Compensation Solution : 1.0000

Corrective_measure_for_Compensation: 62.5154

Evaluation of Compensation solution : 554.0023

Amplification Solution Cost: 84.0000

Weight of Amplification Solution : 1.0000

Corrective_measure_for_Amplification: 9.0835

Evaluation of Amplification solution : 85.3625

3R Solution Cost: 0.0000

Weight of 3R Solution : 1.0000

Corrective_measure_for_3r_cards: 0.0000

Evaluation of 3R solution : 0.0000

Corrective_measure_for_irrealizability : 0.0000

Validity ratio : 0.4368

Evaluation function : 3101.8942

```
#####
# PL Realizability : TRUE #
#####

#####
# Realizability : TRUE #
#####
```

5.3.2.4 Solution NSF NAR

La solution NSF NAR optimise le coût de la conception d'un réseau optique WDM en considérant les contraintes de budget de puissance et de bruit optique.

Voici les valeurs de la fonction objectif multipliée par la réalisabilité pour 100 itérations figure 5.5. Nous remarquons une différence entre la valeur minimale MIN SIM de la fonction objectif de l'heuristique d'optimisation simultanée du réseau NSF (2534 k\$) et celle de l'optimisation séquentielle MIN SEQ (2593 K\$), soit une différence de 59 k\$. Ceci démontre que la l'optimisation simultanée du réseau optique NSF dans le cas où l'on considère les contraintes de budget de puissance et de bruit nécessite moins d'équipements que l'optimisation séquentielle.

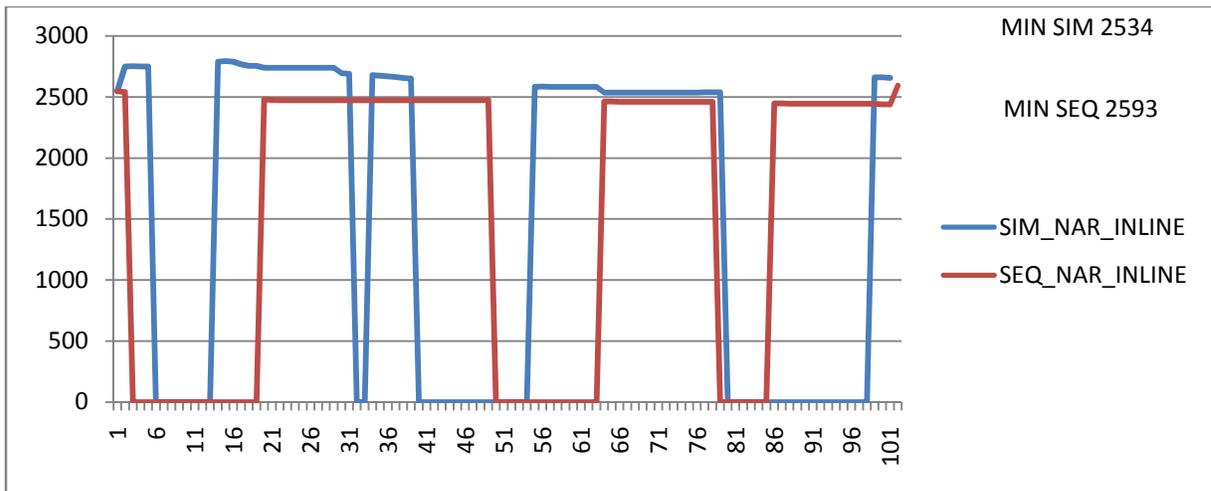


Figure 5.5 : Valeur de la fonction objectif multipliée par la réalisabilité de la solution NSF NAR

Statistiques de la meilleure solution NSF NAR issue de l'optimisation simultanée

Statistics and Evaluation for the current best solution

=====

100 iterations done (including the initial iteration) within 142 sec.

The best solution was found at iteration 63 after 103 sec.

Capacity Statistics

Overall STS-0 used capacity : 507

Overall STS-48 used capacity : 41

Overall STS-192 used capacity : 502

Over max (STS-192) used capacity : 0

Overall network available capacity : 98352

Overall network used capacity : 78025

Overall network occupation : 79.3324 %

Transport card Statistics

OC-48 : Total of 23 transport cards needed

OC-192 : Total of 236 transport cards needed

OC-48 : Total of 12 port wasted

OC-192 : Total of 8 port wasted

Amplification Statistics

Total number of amplifiers needed = 82

Cost function

Cost of Network Solution : 2452.0000

Cost of Transport Cards : -4602.0000

Cost of 3r Cards: 7054.0000

Cost of Amplifiers : 82.0000

Cost of compensation : 0.0000

Overall Cost : **2534.0000**

Evaluation function

Network Solution Cost: 2452.0000

```

Weight of Network Solution: 1.0000
Corrective measure for cards: 11.5741
Weight of corrective measure for cards: 1.0000
Evaluation of Network solution : 2463.5741

Compensation Solution Cost: 0.0000
Weight of Compensation Solution : 1.0000
Corrective_measure_for_Compensation: 0.0000
Evaluation of Compensation solution : 0.0000

Amplification Solution Cost: 82.0000
Weight of Amplification Solution : 1.0000
Corrective_measure_for_Amplification: -7.1611
Evaluation of Amplification solution : 80.9258

3R Solution Cost: 7054.0000
Weight of 3R Solution : 1.0000
Corrective_measure_for_3r_cards: 39.6000
Evaluation of 3R solution : 7093.6000

Corrective_measure_for_irrealizability : 0.0000
Validity ratio : 3.0706
-----
Evaluation function : 9638.0999

#####
# PL Realizability : TRUE #
#####

#####
# Realizability : TRUE #
#####

```

Statistiques de la meilleure solution NSF NAR issue de l'optimisation séquentielle

```

Statistics and Evaluation for the current best solution
=====
101 iterations done (including the initial iteration) within 193 sec.
The best solution was found at iteration 99 after 190 sec.

```

Capacity Statistics

Overall STS-0 used capacity : 515
Overall STS-48 used capacity : 47
Overall STS-192 used capacity : 488
Over max (STS-192) used capacity : 0
Overall network available capacity : 95952
Overall network used capacity : 76322
Overall network occupation : 79.5419 %

Transport card Statistics

OC-48 : Total of 26 transport cards needed
OC-192 : Total of 241 transport cards needed
OC-48 : Total of 4 port wasted
OC-192 : Total of 8 port wasted

Amplification Statistics

Total number of amplifiers needed = 79

Cost function

Cost of Network Solution : 2514.0000
Cost of Transport Cards : 2440.0000
Cost of 3r Cards: 74.0000
Cost of Amplifiers : 79.0000
Cost of compensation : 0.0000

Overall Cost : **2593.0000**

Evaluation function

Network Solution Cost: 2514.0000
Weight of Network Solution: 1.0000
Corrective measure for cards: 13.0527
Weight of corrective measure for cards: 1.0000
Evaluation of Network solution : 2527.0527

Compensation Solution Cost: 0.0000

```

Weight of Compensation Solution : 1.0000
Corrective_measure_for_Compensation: 0.0000
Evaluation of Compensation solution : 0.0000

Amplification Solution Cost: 79.0000
Weight of Amplification Solution : 1.0000
Corrective_measure_for_Amplification: -6.8675
Evaluation of Amplification solution : 77.9699

3R Solution Cost: 74.0000
Weight of 3R Solution : 1.0000
Corrective_measure_for_3r_cards: 9.4400
Evaluation of 3R solution : 83.4400

Corrective_measure_for_irrealizability : 0.0000
Validity ratio : 0.3156

-----
Evaluation function : 2688.4625

#####
# PL Realizability : TRUE #
#####

#####
# Realizability : TRUE #
#####

```

5.3.2.5 Solution NSF NCAR

La solution NSF NCAR optimise le coût de la conception d'un réseau optique WDM en considérant les contraintes de dispersion chromatique, budget de puissance et de bruit optique.

Voici les valeurs de la fonction objectif multipliée par la réalisabilité pour 100 itérations figure 5.6. Nous remarquons une différence entre la valeur minimale MIN SIM de la fonction objectif de l'heuristique d'optimisation simultanée du réseau NSF (3109.25 k\$) et celle de l'optimisation séquentielle MIN SEQ (3124.125 K\$), soit une différence de 14.875 k\$. Ceci démontre que la l'optimisation simultanée du réseau optique NSF dans le cas où l'on

considère les contraintes de dispersion chromatique, de budget de puissance et de bruit nécessite moins d'équipements que l'optimisation séquentielle.

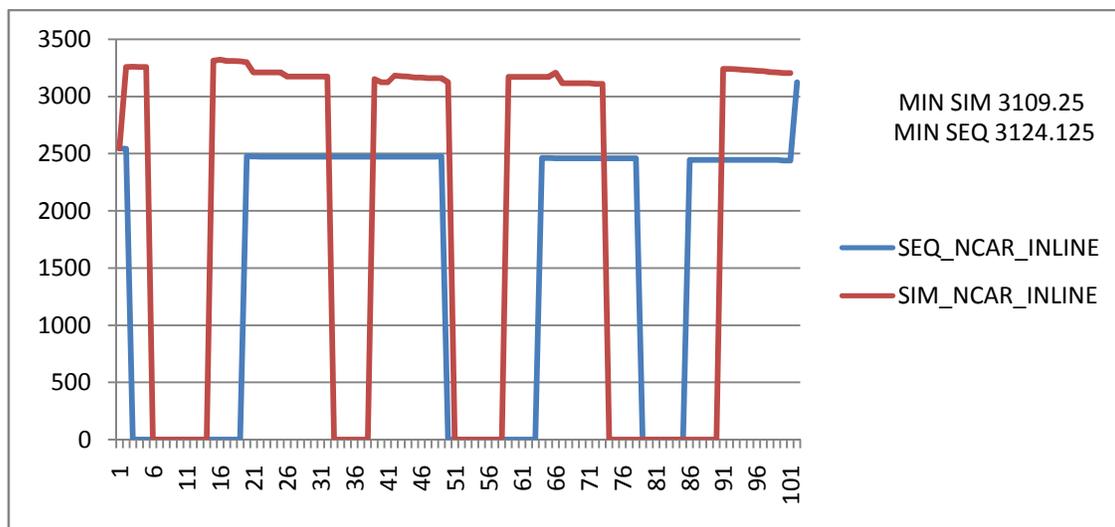


Figure 5.6 : Valeur de la fonction objectif multipliée par la réalisabilité de la solution NSF NCAR

Statistiques de la meilleure solution NSF NCAR issue de l'optimisation simultanée

```

Statistics and Evaluation for the current best solution
=====
100 iterations done (including the initial iteration) within 182 sec.
The best solution was found at iteration 71 after 122 sec.

Capacity Statistics
-----
Overall STS-0 used capacity : 491
Overall STS-48 used capacity : 55
Overall STS-192 used capacity : 504
Over max (STS-192) used capacity : 0
Overall network available capacity : 99408
Overall network used capacity : 77919
Overall network occupation : 78.3830 %

Transport card Statistics
-----

```

OC-48 : Total of 27 transport cards needed
OC-192 : Total of 238 transport cards needed
OC-48 : Total of 2 port wasted
OC-192 : Total of 6 port wasted

Amplification Statistics

Total number of amplifiers needed = 84

Cost function

Cost of Network Solution : 2488.0000
Cost of Transport Cards : -2434.0000
Cost of 3r Cards: 4922.0000
Cost of Amplifiers : 84.0000
Cost of compensation : 537.2500

Overall Cost : **3109.2500**

Evaluation function

Network Solution Cost: 2488.0000
Weight of Network Solution: 1.0000
Corrective measure for cards: 13.4516
Weight of corrective measure for cards: 1.0000
Evaluation of Network solution : 2501.4516

Compensation Solution Cost: 537.2500
Weight of Compensation Solution : 1.0000
Corrective_measure_for_Compensation: 66.7513
Evaluation of Compensation solution : 547.2627

Amplification Solution Cost: 84.0000
Weight of Amplification Solution : 1.0000
Corrective_measure_for_Amplification: -7.3404
Evaluation of Amplification solution : 82.8989

3R Solution Cost: 4922.0000
Weight of 3R Solution : 1.0000
Corrective_measure_for_3r_cards: 182.0800

```
Evaluation of 3R solution : 5104.0800
Corrective_measure_for_irrealizability : 0.0000
Validity ratio : 0.8367
```

```
-----
Evaluation function : 8235.6932
```

```
#####
# PL Realizability : TRUE #
#####
```

```
#####
# Realizability : TRUE #
#####
```

Statistiques de la meilleure solution NSF NCAR issue de l'optimisation séquentielle

```
Statistics and Evaluation for the current best solution
```

```
=====
101 iterations done (including the initial iteration) within 204 sec.
The best solution was found at iteration 99 after 201 sec.
```

```
Capacity Statistics
```

```
-----
Overall STS-0 used capacity : 515
Overall STS-48 used capacity : 47
Overall STS-192 used capacity : 488
Over max (STS-192) used capacity : 0
Overall network available capacity : 95952
Overall network used capacity : 76322
Overall network occupation : 79.5419 %
```

```
Transport card Statistics
```

```
-----
OC-48 : Total of 26 transport cards needed
OC-192 : Total of 241 transport cards needed
OC-48 : Total of 4 port wasted
OC-192 : Total of 8 port wasted
```

```
Amplification Statistics
```

```
-----
```

Total number of amplifiers needed = 81

Cost function

Cost of Network Solution : 2514.0000

Cost of Transport Cards : 2440.0000

Cost of 3r Cards: 74.0000

Cost of Amplifiers : 81.0000

Cost of compensation : 529.1250

Overall Cost : **3124.1250**

Evaluation function

Network Solution Cost: 2514.0000

Weight of Network Solution: 1.0000

Corrective measure for cards: 13.0527

Weight of corrective measure for cards: 1.0000

Evaluation of Network solution : 2527.0527

Compensation Solution Cost: 529.1250

Weight of Compensation Solution : 1.0000

Corrective_measure_for_Compensation: 67.0715

Evaluation of Compensation solution : 539.1857

Amplification Solution Cost: 81.0000

Weight of Amplification Solution : 1.0000

Corrective_measure_for_Amplification: -7.0116

Evaluation of Amplification solution : 79.9483

3R Solution Cost: 74.0000

Weight of 3R Solution : 1.0000

Corrective_measure_for_3r_cards: 70.6400

Evaluation of 3R solution : 144.6400

Corrective_measure_for_irrealizability : 0.0000

Validity ratio : 0.3156

Evaluation function : 3290.8266

```
#####  
# PL Realizability : TRUE #  
#####
```

```
#####  
# Realizability : TRUE #  
#####
```

Chapitre 6 : Conclusion

Nous avons développé deux heuristiques d'optimisation multicouche des réseaux optiques WDM pour la résolution à moindre coût du problème de groupage de routage et d'affectation de longueurs d'ondes (*GRWA*).

L'heuristique *CLTABU_SEQ* (*Cross Layer TABU SEQuential*) optimise la conception de la couche réseau WDM pour ensuite concevoir sa couche physique. L'heuristique *CLTABU_SIM* (*Cross Layer TABU SIMultaneous*) optimise simultanément la conception des couches réseau et physique du réseau WDM.

Nous avons exécuté les deux heuristiques sur le réseau optique WDM NSFNET (*National Science Foundation Network*). Les résultats obtenus ont démontré que l'heuristique simultanée permet de concevoir un réseau optique WDM moins coûteux que celui conçu avec une heuristique séquentielle.

La présente recherche constitue un pas en avant par rapport à ce qui a été exploré dans la littérature des algorithmes d'optimisation multicouche. Elle se démarque particulièrement par le fait qu'elle prend en compte trois contraintes de la couche physique. Cette étude combinée avec la considération de deux capacités de transport simultanément constitue une voie de recherche encore inexplorée dans ce domaine.

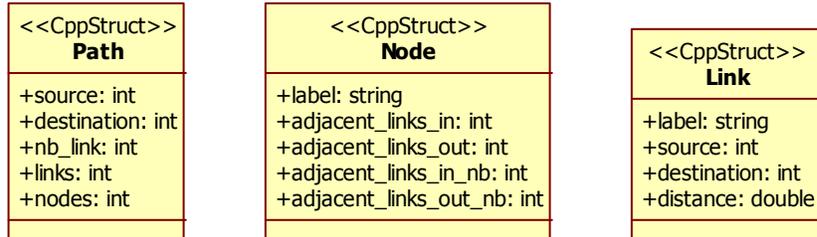
Toutefois, pour améliorer ce travail, il faudrait porter une attention plus particulière au temps d'exécution des algorithmes. En fait, le temps de calcul demeure encore assez long pour exécuter des simulations où le nombre de longueur d'onde peut varier dynamiquement.

Pour les travaux futurs, il serait intéressant d'aboutir à une modélisation de plus en plus proche de la réalité industrielle. Pour atteindre cet objectif, il convient de prendre en compte simultanément d'autres paramètres de la couche physique. Le fait de considérer la dispersion chromatique, le budget de puissance et le bruit optique constitue en fait une première dans cette direction. À titre d'exemple, il faudrait tenir compte du phénomène de dispersion modale de polarisation (PMD) où encore modéliser la dispersion chromatique comme une fonction de la longueur d'onde.

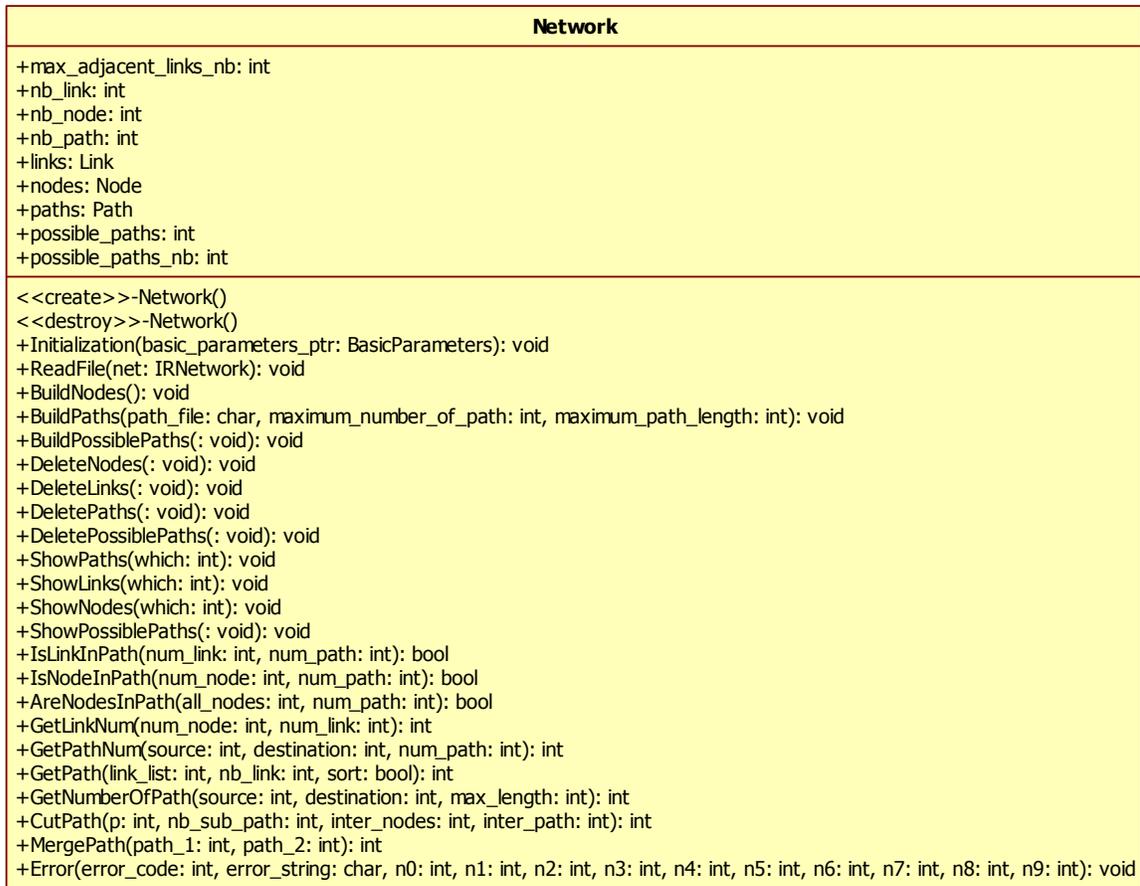
Notons aussi que notre étude avait pour objectif de minimiser le coût de conception d'un réseau optique WDM dans le cas d'un trafic statique. Il faudrait idéalement pouvoir considérer le cas où le trafic est dynamique et ajouter d'autres fonctions objectifs comme par exemple celle qui maximiserait le nombre de connexions acceptées.

Annexe A

Structures de la classe Network :



Détails de la classe Network :



Détails de la classe Traffic :

Traffic
-nb_node: int +connections: int +nb_connection: int
<<create>>-Traffic() <<destroy>>-Traffic() +Initialization(basic_parameters_ptr: BasicParameters): void +ReadFile(net: IRNetwork): void +DeleteConnections(: void): void +ShowConnections(: void): void +GetMinimalNumberOfFlow(: void): int +GetAverageInterNodeTraffic(: void): double +Error(error_code: int, error_string: char, n0: int, n1: int, n2: int, n3: int, n4: int, n5: int, n6: int, n7: int, n8: int, n9: int): void

Détails de la classe Problem :

Problem
-network: Network -traffic: Traffic -begin_time: Time -current_time: Time -working_directory: char -nb_wavelength: int -nb_node: int -nb_link: int -first_hash_bloc: HashBloc -last_hash_bloc_ptr: HashBloc -tabu_list: TabuList -minimum_required_capacity: int -difficulty_ratio: double -lower_bound_number_of_OC48_cards: int -lower_bound_number_of_OC192_cards: int -lower_bound: double -best_iteration: int -best_time: Time -best_solution: Solution -best_solution_eval: Evaluation -current_solution: Solution -current_solution_eval: Evaluation -previous_best_solution: Solution -iteration_excelsheet: ExcelSheet -nb_deterioration_realizable: int -nb_deterioration_irrealizable: int -nb_stagne_realizable: int -nb_stagne_irrealizable: int
<<create>>-Problem(path: char, previous_best: Solution) <<destroy>>-Problem() +Initialization(: void): void +OpenIterationFile(fichier: char): void +CloseIterationFile(: void): void +OutputFirstAnalysis(output: ostream): void +Solve(: void): void +ExploreSIM(: void): void +ExploreSEQ(: void): void +RegisterIteration(current_solution: Solution, iteration: int, previous_eval: Evaluation, current_eval: Evaluation, string: char): int +WriteSolutionToExcelSheet(current_solution: Solution, iteration: int, current_eval: Evaluation, look_at_hook: bool, index: int): void +WriteSolutionDetails(progress_prefix: char, solution: Solution, current_iteration: int, record_to_excelsheet: bool): void +GetTime(: void): Time +PrintTime(out: ostream): void +GetBestSolution(: void): Solution +AdjustValidityRatio(realizable: bool, pl_realizable: bool): void +ComputeLowerBound(: void): void +ComputeDifficultyRatio(: void): void +CreateDirectory(directory_name: char): void +Error(error_code: int, error_string: char, n0: int, n1: int, n2: int, n3: int, n4: int, n5: int, n6: int, n7: int, n8: int, n9: int): void

Structures de la classe Evaluation:

<<CppStruct>> TotalPortCard
+nb_port: int +nb_card: int +nb_wasted_port: int

<<CppStruct>> TotalCapacity
+unused: int +nb_over: int +over: int

<<CppStruct>> TotalInterruption
+count: int +overall_count: int +nb_over: int +over: int

<<CppStruct>> TotalCompensation
+considering: bool +nb_link_with_compensation: int +number_of_compensated_wavelength_in_link: int +nb_km_to_compensate: double +number_of_km_to_compensate_in_link: double

<<CppStruct>> TotalAmplification
+considering: bool +number_of_link_with_amplification: int +link_gain: double +number_of_amplified_wavelength_in_link: int +number_of_amplifier_in_link: int +number_of_amplifiers: int

<<CppStruct>> Total3R
+considering: bool +number_of_3r_port: int +number_of_3r_card: int +number_of_3r_wasted_port: int +number_of_3r_cards_in_link: int +number_of_wavelength_with_3r_cards_in_link: int

Détails de la classe Évaluation

Evaluation
<pre>-nb_node: int -nb_link: int -nb_wavelength: int +validity_ratio: double +total_port_card: TotalPortCard +total_capacity: TotalCapacity +total_interruption: TotalInterruption +total_compensation: TotalCompensation +total_amplification: TotalAmplification +total_3r: Total3R +total_osnr: TotalOSNR +value_for_cards: double +value_for_compensation: double +value_for_amplification: double +value_for_3r_cards: double +objective_value: double +corrective_measure_for_irrealizability: double +corrective_measure_for_cards: double +corrective_measure_for_compensation: double +corrective_measure_for_amplification: double +corrective_measure_for_3r_cards: double +evaluation_value: double +realizable: bool +p1_realizable: bool +CapacityOverflow: bool +InterruptionOverflow: bool</pre>
<pre><<create>>-Evaluation() <<destroy>>-Evaluation() +Compute(consider_compensation: bool, consider_amplification: bool, consider_osnr: bool): void +Print(string: char): void <<CppOperator>>+=(evaluation: Evaluation): void <<CppOperator>>+=(received_total_port_card: TotalPortCard): void <<CppOperator>>+=(received_total_capacity: TotalCapacity): void <<CppOperator>>+=(received_total_interruption: TotalInterruption): void <<CppOperator>>+=(received_total_compensation: TotalCompensation): void <<CppOperator>>+=(received_total_amplification: TotalAmplification): void <<CppOperator>>+=(received_total_3r: Total3R): void <<CppOperator>>+=(received_total_osnr: TotalOSNR): void +Error(error_code: int, error_string: char, n0: int, n1: int, n2: int, n3: int, n4: int, n5: int, n6: int, n7: int, n8: int, n9: int): void</pre>

Détails de la classe solution :

Solution
<pre>-nb_node: int -nb_link: int -nb_wavelength: int -_3R_PRE_AMP_interruption_added: bool -_3R_INLINE_PRE_AMP_interruption_added: bool -_3R_INLINE_AMP_interruption_added: bool -PRE_AMP_OSNR_realizability: bool -INLINE_PRE_AMP_OSNR_realizability: bool -INLINE_AMP_OSNR_realizability: bool -OSNR_realizability: bool -NA_built: bool -NC_built: bool -NCA_built: bool -NAC_built: bool -NAR_built: bool -NCAR_built: bool -NACR_built: bool -NARC_built: bool -network: Network +NA: Solution +NC: Solution +NCA: Solution +NAC: Solution +NAR: Solution +NCAR: Solution +NACR: Solution +NARC: Solution +NW: Solution +traffic: Filling +link_wavelength_quantity: int +link_wavelength_capacity: int +track: int +compensation: Compensation +amplification: Amplification +fibre_power_budget: Fibre_power_budget +fibre_compensation: Fibre_compensation +fibre_PRE_AMP_osnr: Fibre_PRE_AMP_osnr +fibre_INLINE_AMP_osnr: Fibre_INLINE_AMP_osnr +fibre_INLINE_PRE_AMP_osnr: Fibre_INLINE_PRE_AMP_osnr +hash_value_0: unsigned int +hash_value_1: unsigned int +port_node: PortNode +port_node_backup: PortNode +compile_hop: int <<create>>-Solution() <<destroy>>-Solution() +CreateTraffic(: void): void +CreateLinkWavelength(: void): void +CreateTrack(: void): void +CreatePortNode(: void): void +CreateCompensation(: void): void +CreateAmplification(: void): void +CreateFibrePowerBudget(: void): void +CreateFibreCompensation(: void): void +CreateFibrePreAmpOsnr(: void): void +CreateFibreInlinePreAmpOsnr(: void): void +CreateFibreInlineAmpOsnr(: void): void +DeleteTraffic(: void): void +DeleteLinkWavelength(: void): void +DeleteTrack(: void): void +DeletePortNode(: void): void +DeleteCompensation(: void): void +DeleteAmplification(: void): void +DeleteFibrePowerBudget(: void): void +DeleteFibreCompensation(: void): void +DeleteFibrePreAmpOsnr(: void): void +DeleteFibreInlinePreAmpOsnr(: void): void +DeleteFibreInlineAmpOsnr(: void): void +Initialize(received_traffic: Traffic): void +InitializeTraffic(received_traffic: Traffic): void +InitializeLinkWavelength(: void): void +InitializeTrack(: void): void +InitializePortNode(: void): void +InitializeCompensation(: void): void +InitializeAmplification(: void): void +InitializeFibrePowerBudget(: void): void +InitializeFibreCompensation(: void): void +InitializeFibrePreAmpOsnr(: void): void +InitializeFibreInlinePreAmpOsnr(: void): void +InitializeFibreInlineAmpOsnr(: void): void +Adding(f: Flow, evaluation: Evaluation): void +Removing(f: Flow, evaluation: Evaluation): void +Add(f: Flow, evaluation: Evaluation): void +Remove(f: Flow, evaluation: Evaluation): void +AddOccupation(f: Flow): int +RemoveOccupation(f: Flow): int +AnalyzeNode(num_node: int, num_wavelength: int): void +UpdateInterruption(num_wavelength: int): void +Update3RInterruption(num_wavelength: int): void</pre>

```

+AddAmplifiersToCurrentSolution(): void
+AddCompensationToCurrentSolution(): void
+Add_PRE_AmplifiersAnd3RToCurrentSolution(PRE_AMP_OSNR_realizability: bool): bool
+Add_INLINE_PRE_AmplifiersAnd3RToCurrentSolution(INLINE_PRE_AMP_OSNR_realizability: bool): bool
+Add_INLINE_AmplifiersAnd3RToCurrentSolution(INLINE_AMP_OSNR_realizability: bool): bool
+BuildNA(post_eval: Evaluation, solution_already_arranged: bool): void
+BuildNC(post_eval: Evaluation, solution_already_arranged: bool): void
+BuildNCA(post_eval: Evaluation, solution_already_arranged: bool): void
+BuildNAC(post_eval: Evaluation, solution_already_arranged: bool): void
+BuildNAR(post_eval: Evaluation, solution_already_arranged: bool): void
+BuildNCR(post_eval: Evaluation, solution_already_arranged: bool): void
+BuildNACR(post_eval: Evaluation, solution_already_arranged: bool): void
+BuildNARC(post_eval: Evaluation, solution_already_arranged: bool): void
+BuildNW(post_eval: Evaluation): void
+PlaceHook(: void): void
+ResetHook(: void): void
+Segment(assert: Evaluation, the_wavelength: int): int
+ReSegment(the_node_1: int, the_node_2: int, the_wavelength: int): void
+CountPortCard(total_port_card: TotalPortCard, num_node: int): void
+CountCapacity(total_capacity: TotalCapacity, num_wavelength: int): void
+CountInterruption(total_interruption: TotalInterruption, segmented: bool): void
+CountCompensation(total_compensation: TotalCompensation): void
+CountAmplification(total_amplification: TotalAmplification): void
+Count3R(total_3r: Total3R): void
+CountOSNR(total_osnr: TotalOSNR): void
+Evaluate(evaluation: Evaluation, count_compensation: bool, count_amplification: bool, count_osnr: bool): void
+FirstSolution(print_string: char, iteration: int): void
+BuildPhysicalLayer(solution_eval: Evaluation): void
+ImportFromFile(print_string: char, iteration: int, filename: char, double_check: bool): bool
+MoveFlot(print_string: char, tabu_list: TabuList, previous: Evaluation, next: Evaluation, iteration: int, the_node: int, cx_scan: int, alternative_scan: int, cut: bool, rescue: bool): int
+RemovePort(print_string: char, tabu_list: TabuList, previous: Evaluation, next: Evaluation, iteration: int, the_node: int, method: int, consider_taboo: bool): int
+RemoveCompensationFromLink(print_string: char, tabu_list: TabuList, previous: Evaluation, next: Evaluation, iteration: int, critere: int, consider_taboo: bool): int
+RemoveAmplificationFromLink(print_string: char, tabu_list: TabuList, previous: Evaluation, next: Evaluation, iteration: int, critere: int, consider_taboo: bool): int
+GetRemovingPortList(removing_port_list: RemovingPort, num_node: int): void
+RemovingCompensationOnLink(flow_list: Flow, nb_flow: int, num_link: int): bool
+RemovingAmplificationOnLink(flow_list: Flow, nb_flow: int, num_link: int): bool
+OutputWithWriter(filename: char, minimize_cut: bool, post_optimized: Solution): int
+OutputTraffic(output: ostream): void
+OutputLinkWavelength(output: ostream, count_compensation: bool, count_amplification: bool, count_osnr: bool): void
+OutputDetailPort(output: ostream): void
+Hash(: void): void
+GetHashValue0(): unsigned int
+GetHashValue0(string: char): void
+GetHashValue1(): unsigned int
+GetHashValue1(string: char): void
<<CppOperator>> +=(solution: Solution): void
+GetTotalNumberOfFlow(: void): int
+GetTotalNumberOf192Flow(: void): int
+GetTotalNumberOf192Port(: void): int
+GetFlow(cx: Connection): Flow
+ComputeStat(stat: Stat): void
+GetNodeStat(node_stat: NodeStat): void
+SavePortNode(num_node: int, save_count: bool): void
+RestorePortNode(num_node: int): void
+GetRange(number_of_flow: int): int
+Error(error_code: int, error_string: char, n0: int, n1: int, n2: int, n3: int, n4: int, n5: int, n6: int, n7: int, n8: int, n9: int): void

```

Fonction d'exploration de l'espace de solution

```

void Problem::Explore (void)
{
    int best, i, j, swap, shot = -1, iteration = 0;
    int macro_iteration = 0, lasttime = 1000;
    Evaluation previous, next;
    char print_string[MAX_LINE];
    char filename[MAX_LINE];
    Solution solution;
    NodeStat node_stat[256];
    int node_list[256];

    solution.Initialization (exe->traffic);

    solution.FirstSolution (print_string, 0);
    solution.ResetHook();
    solution.ArrangeSolution (&next);
    //initialisation du nombre de détérioration et du nombre de stagnation
    nb_deterioration = 0, nb_stagne = 0;
    nb_deterioration_realizable = 0, nb_stagne_realizable = 0;

```

```

nb_deterioration_irrealizable = 0, nb_stagne_irrealizable = 0;

// min_validity_ratio = 1;
// max_validity_ratio = 5;
if (next.realizable == true)
    Evaluation::validity_ratio = exe->validity_ratio_minimum;
else
    Evaluation::validity_ratio = exe->validity_ratio_maximum;

//itération de la solution réseau initiale = 0
iteration = 0;

//on enregistre l'itération de la solution initiale dans le fichier
//evolutions.xls
RegisterIteration (solution, iteration, previous, next, print_string);
//compile les résultats dans les fichiers txt
WriteSolutionDetails ("initial", &solution, iteration, true);
i=0;
//lorsque la solution initiale est irrealisable ont fait des moves avec
//realizable = true
while (Evaluation::validity_ratio > (exe->validity_ratio_maximum - 0.01))
{
    i++;
    if (i > 10)
        break;
    while(1)
    {
        tabu_list.Reset();
        solution.MoveFlot(print_string, tabu_list, previous, next, iteration,
            -1, 100, 100, false, true);
        if (RegisterIteration (solution, iteration, previous, next,
            print_string) == 1)
            return;
    }
}

while (1)
{
    shot++;
    if (shot >= 3)
        shot = 0;

    i = 0;
    //lorsque la solution initiale est irrealisable ont fait des moves
    //avec realizable = true
    while (Evaluation::validity_ratio >
        (exe->validity_ratio_maximum - 0.01)
        )
    {
        i++;
        if (i > 10)
            break;
        tabu_list.Reset();
        solution.MoveFlot (print_string, tabu_list, previous, next,
            iteration, -1, 100, 100, false, true);
        if (RegisterIteration (solution, iteration, previous, next,
            print_string) == 1)

```

```

        return;
    }
    solution.GetNodeStat (node_stat);
    for (i = 0; i < network->nb_node; i++)
        node_list[i] = i;
    //on ordonne les noeuds selon un certain critère
    for (i = 0; i < network->nb_node; i++)
    {
        for (best = i, j = i + 1; j < network->nb_node; j++)
        {
            if (
                (
                    node_stat[node_list[j]].unused +
                    (node_stat[node_list[j]].bw_int_in +
                    node_stat[node_list[j]].bw_int_out)
                ) >
                (
                    node_stat[node_list[best]].unused +
                    (node_stat[node_list[best]].bw_int_in +
                    node_stat[node_list[best]].bw_int_out)
                )
            )
                best = j;
        }
        swap = node_list[i];
        node_list[i] = node_list[best];
        node_list[best] = swap;
    }
    //////////////////////////////////////SCENARIO A
    if (exe->extra_3 == 0)
    {
        switch (shot)
        {
            case 0:
                for (i = 0; i < nb_node * 1 / 3; i++)
                {
                    do
                    {
                        solution.MoveFlot(print_string, tabu_list, previous,
                        next, iteration, node_list[i], 100, 100, false, false);
                        if (RegisterIteration (solution, iteration, previous,
                        next, print_string) == 1)
                            return;
                    }
                    while (
                        (
                            nb_deterioration <
                            exe->maximum_number_of_deterioration
                        ) &&
                        (nb_stagne < exe->maximum_number_of_stagnation)
                    );
                }
                break;
            case 1:
                solution.RemovePort (print_string, tabu_list, previous, next,
                iteration, node_list[0], 0);
                if (RegisterIteration (solution, iteration, previous,

```

```

                                next, print_string) == 1)
    return;
    solution.RemovePort (print_string, tabu_list, previous, next,
                        iteration, node_list[1], 1);
    if (RegisterIteration (solution, iteration, previous,
                          next, print_string) == 1)
        return;
    for (i = 0; i < nb_node * 1 / 4; i++)
    {
        do
        {
            solution.MoveFlot (print_string, tabu_list, previous,
                              next, iteration, node_list[i + 2],
                              100, 100, false, false);
            if (RegisterIteration (solution, iteration, previous,
                                  next, print_string) == 1)
                return;
        }
        while (
            (
                nb_deterioration <
                exe->maximum_number_of_deterioration
            ) &&
            (nb_stagne < exe->maximum_number_of_stagnation)
        );
    }
    break;

case 2:
    solution.MoveFlot (print_string, tabu_list, previous, next,
                      iteration, node_list[0], 100, 100, true,
                      false);
    if (RegisterIteration (solution, iteration, previous,
                          next, print_string) == 1)
        return;
    for (i = 0; i < nb_node * 1 / 5; i++)
    {
        do
        {
            solution.MoveFlot (print_string, tabu_list, previous,
                              next, iteration, node_list[i + 1],
                              100, 100, false, false);
            if (RegisterIteration (solution, iteration, previous,
                                  next, print_string) == 1)
                return;
        }
        while (
            (
                nb_deterioration <
                exe->maximum_number_of_deterioration
            ) &&
            (nb_stagne < exe->maximum_number_of_stagnation)
        );
    }
    break;

default:

```

```

        Error (0, "Error extra 3 == 0");
        break;
    }
}
else if (exe->extra_3 == 1)
//////////SCENARIO B
{
    switch (shot)
    {
    case 0:
        solution.RemovePort (print_string, tabu_list, previous,
                             next, iteration, node_list[0], 0);
        if (RegisterIteration (solution, iteration, previous,
                              next, print_string) == 1)
            return;
        for (i = 0; i < nb_node * 2 / 5; i++)
        {
            do
            {
                solution.MoveFlot (print_string, tabu_list, previous,
                                   next, iteration, node_list[i], 100,
                                   100, false, false);
                if (RegisterIteration (solution, iteration, previous,
                                      next, print_string) == 1)
                    return;
            }
            while (
                (
                    nb_deterioration <
                    exe->maximum_number_of_deterioration
                ) &&
                (nb_stagne < exe->maximum_number_of_stagnation)
            );
        }
        break;

    case 1:
        solution.RemovePort (print_string, tabu_list, previous,
                             next, iteration, node_list[0], 0);
        if (RegisterIteration (solution, iteration, previous,
                              next, print_string) == 1)
            return;
        solution.RemovePort (print_string, tabu_list, previous,
                             next, iteration, node_list[1], 1);
        if (RegisterIteration (solution, iteration, previous,
                              next, print_string) == 1)
            return;
        for (i = 0; i < nb_node * 1 / 3; i++)
        {
            do
            {
                solution.MoveFlot (print_string, tabu_list, previous,
                                   next, iteration, node_list[i], 100,
                                   100, false, false);
                if (RegisterIteration (solution, iteration, previous,
                                      next, print_string) == 1)
                    return;
            }
        }
    }
}

```

```

        }
        while (
            (
                nb_deterioration <
                exe->maximum_number_of_deterioration
            ) &&
            (nb_stagne < exe->maximum_number_of_stagnation)
        );
    }
    break;
case 2:
    solution.MoveFlot (print_string, tabu_list, previous,
                      next, iteration, node_list[0], 100,
                      100, true, false);
    if (RegisterIteration (solution, iteration, previous,
                          next, print_string) == 1)
        return;
    for (i = 0; i < nb_node * 1 / 5; i++)
    {
        do
        {
            solution.MoveFlot (print_string, tabu_list, previous,
                              next, iteration, node_list[i + 1],
                              100, 100, false, false);
            if (RegisterIteration (solution, iteration, previous,
                                  next, print_string) == 1)
                return;
        }
        while (
            (
                nb_deterioration <
                exe->maximum_number_of_deterioration
            ) &&
            (nb_stagne < exe->maximum_number_of_stagnation)
        );
    }
    solution.RemovePort (print_string, tabu_list, previous,
                        next, iteration, node_list[1], 0);
    if (RegisterIteration (solution, iteration, previous,
                          next, print_string) == 1)
        return;
    break;
default:
    Error (0, "Error extra 3 == 1");
    break;
}
}
else if (exe->extra_3 == 2)
    //////////////////////////////////////// SCENARIO C
    {
        switch (shot)
        {
            case 0:
                solution.RemovePort (print_string, tabu_list, previous,
                                    next, iteration, node_list[0], 0);
                if (RegisterIteration (solution, iteration, previous,
                                      next, print_string) == 1)

```

```

        return;

    for (i = 0; i < nb_node * 2 / 5; i++)
    {
        do
        {
            solution.MoveFlot (print_string, tabu_list, previous,
                               next, iteration, node_list[i], 100,
                               100, false, false);
            if (RegisterIteration (solution, iteration, previous,
                                   next, print_string) == 1)
                return;
        }
        while (
            (
                nb_deterioration <
                exe->maximum_number_of_deterioration
            ) &&
            (nb_stagne < exe->maximum_number_of_stagnation)
        );
    }
    solution.MoveFlot (print_string, tabu_list, previous,
                       next, iteration, node_list[0], 100,
                       100, true, false);

    if (
        RegisterIteration (solution, iteration, previous,
                           next, print_string) == 1)
        return;

    break;

case 1:
    solution.RemovePort (print_string, tabu_list, previous,
                          next, iteration, node_list[0], 0);
    if (RegisterIteration (solution, iteration, previous,
                           next, print_string) == 1)
        return;

    solution.MoveFlot (print_string, tabu_list, previous,
                       next, iteration, node_list[1], 100,
                       100, true, false);
    if (RegisterIteration (solution, iteration, previous,
                           next, print_string) == 1)
        return;

    solution.RemovePort (print_string, tabu_list, previous,
                          next, iteration, node_list[2], 1);
    if (RegisterIteration (solution, iteration, previous,
                           next, print_string) == 1)
        return;

    for (i = 0; i < nb_node * 1 / 2; i++)
    {
        do
        {
            solution.MoveFlot (print_string, tabu_list, previous,
                               next, iteration, node_list[i],

```

```

        100, 100, false, false);
    if (RegisterIteration (solution, iteration, previous,
                          next, print_string) == 1)
        return;
    }
    while (
        (
            nb_deterioration <
            exe->maximum_number_of_deterioration
        ) &&
        (nb_stagne < exe->maximum_number_of_stagnation)
    );
    }
    break;

case 2:
    solution.MoveFlot (print_string, tabu_list, previous,
                      next, iteration, node_list[0], 100,
                      100, true, false);
    if (RegisterIteration (solution, iteration, previous,
                          next, print_string) == 1)
        return;

    for (i = 0; i < nb_node * 1 / 4; i++)
    {
        do
        {
            solution.MoveFlot (print_string, tabu_list, previous,
                              next, iteration, node_list[i + 1],
                              100, 100, false, false);
            if (RegisterIteration (solution, iteration, previous,
                                  next, print_string) == 1)
                return;
        }
        while (
            (
                nb_deterioration <
                exe->maximum_number_of_deterioration
            ) &&
            (nb_stagne < exe->maximum_number_of_stagnation)
        );
    }
    solution.RemovePort (print_string, tabu_list, previous,
                        next, iteration, node_list[1], 0);
    if (RegisterIteration (solution, iteration, previous,
                          next, print_string) == 1)
        return;

    break;

default:
    Error (0, "Error extra 3 == 2");
    break;
}
}
else if (exe->extra_3 == 3)
    //////////////////////////////////////// SCENARIO D

```

```

{
switch (shot)
{
case 0:
solution.RemovePort (print_string, tabu_list, previous,
next, iteration, node_list[0], 0);
if (RegisterIteration (solution, iteration, previous,
next, print_string) == 1)
return;

for (i = 0; i < nb_node * 1 / 2; i++)
{
do
{
solution.MoveFlot (print_string, tabu_list, previous,
next, iteration, node_list[i], 60,
60, false, false);
if (RegisterIteration (solution, iteration, previous,
next, print_string) == 1)
return;
}
}
while (
(
nb_deterioration <
exe->maximum_number_of_deterioration
) &&
(nb_stagne < exe->maximum_number_of_stagnation)
);
}
break;

case 1:
solution.RemovePort (print_string, tabu_list, previous,
next, iteration, node_list[0], 0);
if (RegisterIteration (solution, iteration, previous,
next, print_string) == 1)
return;

solution.MoveFlot (print_string, tabu_list, previous, next,
iteration, node_list[1], 100, 100,
true, false);
if (RegisterIteration (solution, iteration, previous,
next, print_string) == 1)
return;

solution.RemovePort (print_string, tabu_list, previous,
next, iteration, node_list[2], 1);
if (RegisterIteration (solution, iteration, previous,
next, print_string) == 1)
return;

for (i = 0; i < nb_node * 1 / 2; i++)
{
do
{
solution.MoveFlot (print_string, tabu_list, previous,
next, iteration, node_list[i], 80,

```

```

        80, false, false);
    if (RegisterIteration (solution, iteration, previous,
                          next, print_string) == 1)
        return;
    }
    while (
        (
            nb_deterioration <
            exe->maximum_number_of_deterioration
        ) &&
        (nb_stagne < exe->maximum_number_of_stagnation)
    );
    }
    break;

case 2:
    solution.MoveFlot (print_string, tabu_list, previous,
                      next, iteration, node_list[0], 100,
                      100, true, false);
    if (RegisterIteration (solution, iteration, previous,
                          next, print_string) == 1)
        return;

    for (i = 0; i < nb_node * 1 / 2; i++)
    {
        do
        {
            solution.MoveFlot (print_string, tabu_list, previous,
                              next, iteration, node_list[i + 1],
                              100, 100, false, false);
            if (RegisterIteration (solution, iteration, previous,
                                  next, print_string) == 1)
                return;
        }
        while (
            (
                nb_deterioration <
                exe->maximum_number_of_deterioration
            ) &&
            (nb_stagne < exe->maximum_number_of_stagnation)
        );
    }

    break;

default:
    Error (0, "Error extra 3 == 3");
    break;
}
}
}
}

```

Bibliographie

- [1] ITU-T, " G.652. characteristics of a single-mode optical fiber cable," 2003.
- [2] R. Ramaswami and K. N. Sivarajan, *Optical Networks : A Practical Perspective*. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers, 2002.
- [3] H. Apithy, Y. Bouslimani and H. Hamam. Communications à fibres optiques : Limitations causées par la dispersion et les effets non-linéaires. *IEEE Canadian Review* [Online]. 47pp. 24-28. 2004. Available: <http://www.ieee.ca/canrev/cr47/cr47.pdf>.
- [4] H. Zang, J. Jue and B. Mukherjee, "A review of routing and wavelength assignment approaches for wavelength-routed optical WDM networks," *SPIE Optical Networks Magazine*, vol. 1, pp. 47-60, Jan., 2000.
- [5] D. Banerjee and B. Mukherjee, "Wavelength-routed optical networks: linear formulation, resource budgeting tradeoffs, and a reconfiguration study," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 8, pp. 598-607, 10/, 2000.
- [6] A. Houle C., B. Jaumard and Y. Solari, "Dimensioning WDM optical networks with minimum MSPP configuration," in *4th IASTED International Multi-Conference on Wireless and Optical Communications, 7-10 July, 2004, .*
- [7] R. Dutta and G. N. Rouskas, "A Survey of Virtual Topology Design Algorithms for Wavelength Routed Optical Networks ," *Optical Networks Mag*, vol. 1, pp. 73-89, Jan., 2000.
- [8] A. C. Houle, B. Jaumard and Y. Solari, "Optimized traffic grooming as a way to mitigate the effect of chromatic dispersion in metro/regional WDM networks," in *OFCNFOEC 2006. 2006 Optical Fiber Communication Conference and National Fiber Optic Engineers Conference, 5-10 March, 2006*, pp. 3.

-
- [9] D. Bensoussan and Université du Québec. École de technologie supérieure, *Introduction à La Communication Par Fibres Optiques : Une Approche Pratique*. Montréal: École de technologie supérieure, Université du Québec, 2000.
- [10] J. Franz and V. K. Jain, *Optical Communications : Components and Systems : Analysis--Design--Optimization--Application*. Boca Raton, Fla.; New Delhi: CRC Press; Narosa Pub. House, 2000.
- [11] S. Kawai, *Handbook of Optical Interconnects*. New York: Dekker/CRC Press, 2005.
- [12] ITU-T, " G.662. generic characteristics of optical amplifier devices and subsystems," July. 2005.
- [13] ITU-T, "G.653. characteristics of a dispersion-shifted single mode optical fiber," 2003.
- [14] A. Gumaste and T. Antony, *DWDM Network Designs and Engineering Solutions* . Cisco Press, 2003.
- [15] Cisco Systems. Fixed optical filter portfolio for the cisco ONS 15454 multiservice transport platform. [Online]. Available: http://www.cisco.com/application/pdf/en/us/guest/products/ps2006/c1650/ccmigration_09186a00801a5572.pdf.
- [16] ANSI, "**T1.105.01-2001**. synchronous optical network (SONET) - basic description including multiplex structure, rates, and formats," 2001.
- [17] ITU-T, "**G.707**. network node interface for the synchronous digital hierarchy (SDH)," Dec. 2003.
- [18] IEC : International Engineering Consortium. Synchronous optical network (SONET). [Online]. Available: <http://www.iec.org/online/tutorials/sonet/>.
- [19] ANSI, "T1.105.02-2001. synchronous optical network (SONET) - payload mappings," 2001.

-
- [20] ITU-T, "G.7041/Y.1303. generic framing procedure (GFP)," Aug. 2005.
- [21] ITU-T, "G.7042/Y.1305. link capacity adjustment scheme (LCAS) for virtual concatenated signals," March. 2006.
- [22] S. S. Gorshe and T. Wilson, "Transparent generic framing procedure (GFP): a protocol for efficient transport of block-coded data through SONET/SDH networks," *Communications Magazine, IEEE*, vol. 40, pp. 88-95, 2002.
- [23] Cisco Systems. Leveraging transport for data services with Virtual Concatenation (VCAT) and link capacity adjustment scheme (LCAS). [Online]. Available: http://www.cisco.com/warp/public/cc/so/neso/meso/meipac/lcas_wp.pdf.
- [24] Cisco Systems. Cisco ONS 15454 SONET multiservice provisioning platform (MSPP). [Online]. Available: <http://www.cisco.com/en/US/products/hw/optical/ps2006/ps2010/index.html>.
- [25] W. D. Grover, *Mesh-Based Survivable Networks : Options and Strategies for Optical, MPLS, SONET, and ATM Networking*. Upper Saddle River, N.J.; London: Prentice Hall PTR, 2004.
- [26] F. Glover, "Future paths for integer programming and links to artificial intelligence," *Comput. Oper. Res.*, vol. 13, pp. 533-49, /, 1986.
- [27] P. Hansen and B. Jaumard, "Algorithms for the maximum satisfiability problem," *Computing*, vol. 44, pp. 279-303, /, 1990.
- [28] F. Glover, "Tabu search. 1," *ORSA Journal on Computing*, vol. 1, pp. 190-206, 1989.
- [29] F. Glover, "Tabu search. II," *ORSA Journal on Computing*, vol. 2, pp. 4-32, 1990.
- [30] F. Glover, E. Taillard and D. de Werra, "A user's guide to tabu search," *Annals of Operations Research*, vol. 41, pp. 3-28, 05/, 1993.
- [31] F. Glover, "Tabu search: a tutorial," *Interfaces*, vol. 20, pp. 74-94, 07/, 1990.

-
- [32] F. Glover and M. Laguna, *Tabu Search*. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1997.
- [33] F. Glover and G. A. Kochenberger, *Handbook of Metaheuristics*. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2003.
- [34] K. Zhu and B. Mukherjee, "Traffic grooming in an optical WDM mesh network," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 20, pp. 122-33, 01/, 2002.
- [35] K. Zhu and B. Mukherjee, "A Review of Traffic Grooming in WDM Optical Networks: Architectures and Challenges," vol. 4, pp. 55-64, 2003.
- [36] S. M. H. Zaidi and A. Mahmood, "Blocking optimization in dynamic traffic all-optical WDM networks without wavelength conversion," in *Proceedings INMIC 2003. 7th International Multi-Topic Conference, 8-9 Dec. 2003*, 2004, pp. 170-5.
- [37] B. Jaumard and T. D. Hemazro, "Routing and wavelength assignment in single hop all optical networks with minimum blocking," Université de Montréal, Groupe d'Étude et de Recherche en Analyse des Décisions, Tech. Rep. Research Report G-2004-12, Feb. 2004.
- [38] J. Q. Hu and B. Leida, "Traffic grooming, routing, and wavelength assignment in optical WDM mesh networks," in *IEEE INFOCOM 2004, 7-11 March, 2004*, pp. 495-501.
- [39] A. C. Houle, B. Jaumard and Y. Solari, "Addressing the grwa problem in wdm networks with a tabu search algorithm," in *IEEE-CCECE05 Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*, 2005, pp. 1638-1641.
- [40] E. Hyytiä, "Heuristic algorithms for the generalized routing and wavelength assignment problem," in *Seventeenth Nordic Teletraffic Seminar, {NTS}-17*, 2004, pp. 373-386.
- [41] A. L. Chiu and E. H. Modiano, "Traffic grooming algorithms for reducing electronic multiplexing costs in WDM ring networks," *Lightwave Technology, Journal of*, vol. 18, pp. 2-12, 2000.

-
- [42] X. Zhang and C. Qiao, "An effective and comprehensive approach for traffic grooming and wavelength assignment in SONET/WDM rings," *Networking, IEEE/ACM Transactions on*, vol. 8, pp. 608-617, 2000.
- [43] O. Gerstel, R. Ramaswami and G. H. Sasaki, "Cost-effective traffic grooming in WDM rings," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 8, pp. 618-30, 10/, 2000.
- [44] Jian Wang, Wonhong Cho, V. Rao Vemuri and B. Mukherjee, "Improved approaches for cost-effective traffic grooming in WDM ring networks: ILP formulations and single-hop and multihop connections," *J. Lightwave Technol.*, vol. 19, pp. 1645-53, 11/, 2001.
- [45] Jian Wang and R. Mukherjee, "Interconnected WDM ring networks: strategies for interconnection and traffic grooming," *Optical Networks Magazine*, vol. 3, pp. 10-20, 2002.
- [46] V. R. Konda and T. Y. Chow, "Algorithm for traffic grooming in optical networks to minimize the number of transceivers," in *2001 IEEE Workshop on High Performance Switching and Routing*, may 29-31, 2001, pp. 218-221.
- [47] S. Thiagarajan and A. K. Somani, "Traffic grooming for survivable WDM mesh networks," in *OptiComm 2001: Optical Networking and Communications*, 21-22 Aug. 2001, 2001, pp. 54-65.
- [48] R. Ramamurthy and B. Mukherjee, "Fixed-alternate routing and wavelength conversion in wavelength-routed optical networks," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 10, pp. 351-67, 06/, 2002.
- [49] A. Mokhtar and M. Azizoglu, "Adaptive wavelength routing in all-optical networks," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 6, pp. 197-206, 04/, 1998.
- [50] T. R. Jensen and B. Toft, *Graph Coloring Problems*. New York: Wiley, 1995.
- [51] C. V. Saradhi and S. Subramaniam, "Physical layer impairment aware routing (PLIAR) in WDM optical networks: issues and challenges", vol. 11, pp. 109-130, Fourth Quarter 2009.

-
- [52] A. Siamak, P. Yvan, K. Mirosław, M. Eva, C. Davide, S. Josep, A. Marianna and T. Ioannis, "On the offline physical layer impairment aware RWA algorithms in transparent optical networks : State-of-the-art and beyond," in Braunschweig, 2009, .
- [53] I. Tomkos, D. Vogiatzis, C. Mas, I. Zacharopoulos, A. Tzanakaki and E. Varvarigos, "Performance engineering of metropolitan area optical networks through impairment constraint routing," *IEEE Communications Magazine*, vol. 42, pp. 40-47, 2004.
- [54] B. Ramamurthy, D. Datta, H. Feng, J. P. Heritage and B. Mukherjee, "Impact of transmission impairments on the teletraffic performance of wavelength-routed optical networks," *J. Lightwave Technol.*, vol. 17, pp. 1713-23, 10/, 1999.
- [55] J. F. Martins-Filho, C. J. A. Bastos-Filho, E. A. J. Arantes, S. C. Oliveira, L. D. Coelho, J. P. G. de Oliveira, R. G. Dante, E. Fontana and F. D. Nunes, "Novel routing algorithm for transparent optical networks based on noise figure and amplifier saturation," in *Proceedings of the 2003 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference - IMOC 2003, 20-23 Sept. 2003*, 2003, pp. 919-23.
- [56] Kwangil Lee and M. A. Shayman, "Optical network design with optical constraints in IP/WDM networks," *IEICE Trans. Commun.*, vol. E88-B, pp. 1898-905, 05/, 2005.
- [57] Yurong Huang, J. P. Heritage and B. Mukherjee, "Connection provisioning with transmission impairment consideration in optical WDM networks with high-speed channels," *J. Lightwave Technol.*, vol. 23, pp. 982-93, 03/, 2005.
- [58] C. Politi, V. Anagnostopoulos, C. Matrakidis and A. Stavdas, "Physical layer impairment aware routing algorithms based on analytically calculated Q-factor," in *OFCNFOEC 2006. 2006 Optical Fiber Communication Conference and National Fiber Optic Engineers Conference, 5-10 March, 2006*, pp. 3.
- [59] J. He and M. Brandt-Pearce, "RWA using wavelength ordering for crosstalk limited networks," in *OFCNFOEC 2006. 2006 Optical Fiber Communication Conference and National Fiber Optic Engineers Conference, 5-10 March, 2006*, pp. 3.

[60] R. Cardillo, V. Curri and M. Mellia, "Considering transmission impairments in configuring wavelength routed optical networks," in *OFCNFOEC 2006. 2006 Optical Fiber Communication Conference and National Fiber Optic Engineers Conference, 5-10 March, 2006*, pp. 3.

[61] B. Ramamurthy, J. Iness and B. Mukherjee, "Optimizing amplifier placements in a multiwavelength optical LAN/MAN: the unequally powered wavelengths case," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 6, pp. 755-67, 12/, 1998.