
Une technique de Protection à Base de Priorité pour Les Réseaux Optiques WDM

Wissam Fawaz * — **Fabio Martignon** ** — **Ken Chen** * —
Guy Pujolle ***

* *University of Paris 13*

*L2TI Lab, 99, Avenue Jean-Baptiste Clement
93430 Villetaneuse, France*

wissam.fawaz@isep.fr

chen@galilee.univ-paris13.fr

** *Dipartimento di Ingegneria Gestionale e dell'Informazione*

University of Bergamo, Italie.

martignon@elet.polimi.it

*** *University of Paris 6*

*LIP6 Laboratory, 8 rue du Capitaine Scott
75015, Paris, France*

guy.pujolle@lip6.fr

RÉSUMÉ. Dans les réseaux optiques maillés à multiplexage en longueur d'onde (WDM ou Wavelength Division Multiplexing), la disponibilité de la connexion est considérée comme une métrique critique pour la fourniture des services différenciés. En effet, l'un des soucis majeurs des opérateurs est lié à l'amélioration de la disponibilité des services fournis à leurs clients exigeants un niveau de Qualité de Service élevé (client de la haute classe). Atteindre cet objectif est possible à travers le déploiement des différents schémas classiques de protection, à savoir les schémas de protection dédiée et partagée. Cependant, la majorité des travaux concernant les schémas de protection partagée ont considéré les connexions primaires comme également importantes lorsqu'elles sont en contention (concurrence) pour l'usage des ressources du chemin de secours partagé. Comme contribution principale dans cet article, nous proposons donc une amélioration des schémas de protection existants, par l'introduction des priorités relatives parmi les différentes connexions primaires partageant un chemin de secours. Afin d'évaluer numériquement les avantages de la différenciation de service introduit dans notre proposition, nous développons d'abord un modèle mathématique. Puis, en se basant sur ce modèle, nous dérivons des expressions explicites pour les disponibilités moyennes des connexions qui résultent du déploiement des schémas de protection classiques ainsi que du celui proposé. Via cette étude, nous montrons comment la disponibilité des clients de la haute classe de service est améliorée en déployant le schéma à base de priorité. Enfin, nous développons une étude de simulation, où

un ensemble donné de connexions, ayant des exigences prédéfinies en terme de disponibilité, est provisionné dans un réseau, en utilisant des stratégies de protection différentes, y compris celle proposée. À travers cette étude, nous prouvons que la stratégie de protection à base de priorité répond aux exigences de la majorité des connexions de façon rentable comparée aux schémas classiques de protection.

ABSTRACT. One of the major concerns of optical network operators is related to improving the availability of services provided to their highest-class clients through the use of different protection schemes, namely dedicated and shared protection. However, the majority of the work concerning shared protection schemes considered the primary connections as equally important when contending for the use of the backup resources. As a first contribution we therefore propose an improvement of the existing shared protection schemes through the introduction of relative priorities among the different primary connections contending for the access to the protection path. Moreover, as a second contribution, we propose to include a novel service differentiation parameter, the service disruption rate of a connection, to provide differentiated services in a WDM mesh network, and we motivate the use of such a parameter with numerical examples. As a third contribution, we present a mathematical model for both the classical protection schemes and for the proposed priority-aware scheme, deriving explicit analytic expressions for the average availability and service disruption rate resulting from the deployment of such schemes. By solving these models we then evaluate numerically the benefits of the service differentiation feature introduced in our scheme as well as the impact of the service disruption rate as service differentiator.

MOTS-CLÉS : Réseaux optiques, Protection, Modèles mathématiques, Qualité de Service.

KEYWORDS: Optical Networks, Protection, Mathematical Models, Quality of Service.

1. Introduction

La technologie révolutionnaire du multiplexage en longueur d'onde (WDM) augmente d'une façon significative la capacité de transmission des réseaux optiques. Due à cette technologie toujours en évolution, les fibres optiques ont fait l'objet d'une augmentation importante de leurs capacités de transport, qui a déjà atteint l'ordre des téraoctets par seconde. Par conséquent, la panne d'un composant du réseau optique (par exemple, une fibre optique, un brasseur optique, un amplificateur, émetteur/récepteur, etc) peut impacter lourdement les opérateurs des réseaux optiques à cause des énormes pertes de données et de revenus résultantes. Pour évaluer les caractéristiques de pannes des différents composants optiques, le tableau 1 présente le taux moyen de panne et le temps de réparation lié à chaque composant optique selon Bellcore (Telecordia) [ZHA 04]. Dans ce même tableau, Failure-In-Time (FIT) dénote le nombre moyen de panne pendant 10^9 heures, Tx les émetteurs optiques, Rx les récepteurs optiques, et MTTR la durée moyenne de réparation.

Métrique	Statistiques (Telecordia)
MTTR Équipements	2h
MTTR fibres	12h
Taux de pannes fibres	4.39/yr/1000 sheat miles
Taux de pannes Tx	10867 FIT
Taux de pannes Rx	4311 FIT

Tableau 1. Taux de pannes et délais de réparation (Telecordia [ZHA 04])

Deux conclusions principales peuvent être tirées de ces données statistiques : la fréquence d'occurrence des pannes dans les réseaux optiques n'est pas négligeable. De plus, il est clair que le scénario d'échec le plus fréquent est celui des fibres, comparé à ceux de Tx et Rx, surtout pour des longueurs de l'ordre de centaines de kilomètres, cas des réseaux optiques dorsals. Vu les occurrences fréquentes de coupures des fibres et de la perte considérable résultante, la capacité de survie du réseau, ainsi que son impact sur sa conception, deviennent des soucis majeurs pour les opérateurs optiques qui tâchent de rester à la hauteur dans la concurrence pour le transport du trafic large bande. D'ailleurs, avec la migration des réseaux optiques WDM des topologies en anneaux vers des topologies maillées, planifier un réseau WDM maillé robuste fut l'objet d'un nombre considérable d'études [S.R 03, G.M 01, G.E 01] menant à la définition de diverses approches de résilience. Principalement, deux schémas de reprise (résilience) ont été défini : les schémas de *protection* [S.R 99b] et les schémas de *restauration* [S.R 99a]. Dans cet article nous focalisons notre étude sur les schémas de protection, traitant essentiellement l'impact que possèdent ces schémas sur la qualité de service perçue par le client, qui constitue aujourd'hui un domaine émergent et d'intérêt particulier. La protection, étant un procédé proactif, constitue une stratégie clé pour assurer la résilience dans un réseau optique. Par contre, à notre connaissance, ce qui manque toujours dans la littérature est la définition d'une méthodologie systématique permettant de sélectionner un schéma de protection rentable pour chaque connexion optique,

tout en satisfaisant ses besoins en termes de qualité de service. En effet, à l'aide des contrats de service appelé *SLA (Service Level Agreement)*, Un client souscrit aux services optiques auprès de l'opérateur du réseau optique, requérant une certaine garantie de qualité de service. Dans un SLA, les spécifications de niveau de service (*SLS, Service Level Specification*) [W.F 04] quantifient le niveau de qualité de service fourni au client optique. Parmi les SLSs, il y a ceux qui indiquent les contraintes de fiabilité requises par un service souscrit. Les paramètres de fiabilité présentés principalement dans la littérature sont la disponibilité du service et le temps de restauration. Dans cet article, notre attention sera dirigée vers l'étude de la disponibilité du service, ainsi que l'influence de pannes sur la disponibilité des connexions optiques qui est d'un intérêt de plus en plus grandissant pour la communauté optique. Contribuant à la conception de nouvelles stratégies de protection prenant en compte les contraintes de qualité de service requises par les clients et comme contribution principale dans cet article, nous proposons une extension des schémas de protection partagée existants, par l'introduction des priorités relatives entre les différentes connexions primaires partageant un chemin de secours. Afin de montrer l'intérêt de notre proposition par rapport aux schémas existants, l'impact qu'a l'approche proposée sur la qualité de service perçue par le client doit être étudié et comparé à celui de schémas de protection classiques. En plus, pour évaluer l'efficacité du schéma de protection à base de priorité proposé par rapport aux schémas de protection existants, il faut évaluer le coût en terme de ressources (par exemple, nombre de longueurs d'ondes requises) qui résulte du déploiement du schéma proposé ainsi que des schémas de protection existants. Pour cela, nous développons d'abord un modèle mathématique pour les deux cas de protection : *classiques* et *proposées*. Ensuite, en se basant sur ce modèle, on évalue numériquement les disponibilités moyennes des connexions protégées via les divers schémas de protection en question. À travers cette étude, nous montrons comment la disponibilité des clients de haute classe de service est améliorée en déployant le schéma à base de priorité. Enfin, nous montrerons la rentabilité du schéma proposé en terme d'utilisation de ressources, via une étude de simulation portant sur une topologie de réseau typique. À cet égard, un ensemble donné de connexions, ayant des exigences prédéfinies en terme de disponibilité, est provisionné dans le réseau, en déployant des stratégies de protection différentes, y compris celle proposée. Les performances de ces divers schémas de provisionnement sont comparées selon deux critères : les ressources utilisées dans le réseau, ainsi que le taux de satisfaction de disponibilités des par les connexions. Notre étude montre que la stratégie de protection à base de priorité répond aux exigences de la majorité des connexions d'une façon rentable comparée aux schémas classiques de protection. Cet article est organisé comme suit : Dans la section 2 on propose et décrit le schéma de protection à base de priorité. La section 3 présente le modèle mathématique qui sert à évaluer quantitativement l'impact qu'ont les divers schémas de protection analysés dans ce papier sur la disponibilité des connexions. Dans la section 4, on présente des résultats numériques obtenus du modèle mathématique, afin de montrer la différenciation de service résultant du schéma proposé. L'étude de simulation avec les résultats correspondants sont développés dans la section 5. Enfin, La section 6 conclut ce papier et propose des perspectives.

2. Schéma de Protection à Base de Priorité

Cette section présente le schéma de protection proposé qui étend les schémas de protection partagée existants, via l'introduction de priorités relatives parmi les différentes connexions primaires en contention pour l'accès aux chemins de secours. Considérons N chemins primaires ($w_i, i = 1, \dots, N$) ayant la même source et la même destination partageant M chemins de secours ($b_i, i = 1, \dots, M$), c.à dire un schéma de protection M :N, comme le montre la figure 1. Notons que les chemins primaires et de protection peuvent tomber en panne en même temps. Lorsqu'une panne se produit, le processus de réparation est enclenché. Dans le schéma de protection partagée classique, quand plusieurs pannes simultanées ou successives se produisent dans le réseau, toutes les connexions en état de panne sont considérés d'importance égale quant à la contention pour l'acquisition des ressources de secours. Ainsi, la première connexion qui tombe en panne obtient l'accès au chemin de secours (de protection), s'il est disponible, indépendamment des besoins de qualité de service des autres connexions. Donc, une telle stratégie de reprise peut pénaliser les connexions en panne ayant des contraintes de qualité de service plus strict que celle de la connexion déjà protégé. Pour faire face à ce genre de limitation, dans le schéma proposé, ces connexions sont divisés en K ensembles de classes de priorité relatives à la fiabilité, C_1, \dots, C_K , avec N_i connexions appartenant à la classe C_i pour $i = 1$ à K , et $\sum_{i=1}^K N_i = N$. Les connexions appartenant à la classe C_1 ont la plus grande priorité, tandis que celles appartenant à C_K possèdent la plus basse priorité. Quand le chemin primaire d'une connexion t appartenant à la classe C_i tombe en panne, le premier chemin de secours disponible, le cas échéant, est affecté pour protéger la connexion t . Ainsi, la restauration de t est assurée par la commutation de t vers le chemin de secours. Pendant ce temps, des réparations sont effectuées sur le chemin primaire, pour le restaurer afin de le rendre de nouveau opérationnel. Une fois ceci terminé, la connexion restaurée est commuté vers le chemin primaire. Dans le cas contraire, si au moment que t tombe en panne tous les chemins de secours sont déjà occupés par

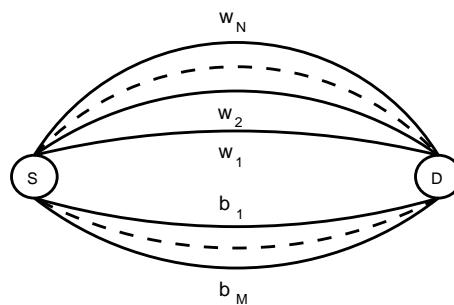


Figure 1. N chemins primaires partageants M chemins de secours entre la source S et la destination D .

la protection d'autres connexions, on vérifie si parmi les connexions protégées il y en a de plus basse priorité que t , c'est à dire ayant une classe comprise entre $i + 1$ et K . Si plusieurs connexions de ce type existent, celle ayant la plus basse priorité est immédiatement préemptée par la connexion t . La connexion préemptée devient ainsi indisponible, attendant la libération d'un autre chemin de secours ou la réparation de son chemin primaire. Enfin, si aucune des deux situations ci-dessus n'est vérifiée, la connexion t devient indisponible.

3. Le Modèle Mathématique

Dans cette section, on présente un modèle mathématique pour le schéma de protection partagée classique $1:N$ et la correspondante extension à base de priorité discutée dans cet article. En développant ce modèle, nous dérivons des expressions explicites pour la disponibilité moyenne d'une connexion, résultant du déploiement des stratégies de protection précédentes. Il est important de noter que la protection dédiée peut être vue comme un cas particulier du schéma de protection partagée avec $N=1$. Comme nous sommes intéressés par la disponibilité d'une connexion, nous devons d'abord la définir. La disponibilité d'une connexion est définie comme la probabilité que cette connexion soit en état de "marche" (*up*) ou de fonctionnement normal à n'importe quel instant [M.T 94]. Elle peut être exprimée comme la proportion du temps pendant laquelle la connexion est en marche durant toute la durée de son service. Si la connexion est routée le long d'un chemin unique non-protégé, sa disponibilité est égale à celle du chemin. Par contre, la disponibilité d'une connexion protégée est déterminée par les deux chemins : primaire et de protection. En d'autres termes, une connexion t protégée serait *disponible* lorsque aucune panne n'affecte son chemin primaire, ou elle est récupérée par le chemin de protection dans le cas de panne du chemin primaire. La connexion t devient indisponible dans les deux cas suivants :

- Une panne se produit sur le chemin primaire de t et une deuxième panne survient sur son chemin de protection ;
- si t partage le chemin de secours avec la connexion t' , alors t sera indisponible si t et t' tombent en panne mais le chemin de protection est saisi par t' . Dans le cas du schéma à base de priorité, cela se produit si t' est plus prioritaire que t .

Dans notre étude nous considérons comme négligeable, l'impact du temps de commutation du trafic du chemin primaire au chemin de secours sur la disponibilité. Cela est dû au fait que ce temps-ci est négligeable (de l'ordre de millisecondes) comparé au temps du maintien de la connexion (de l'ordre des semaines ou de mois).

3.1. *Suppositions de base*

Nous fondons notre étude mathématique sur les suppositions classiques suivantes [J.E 88] :

- Une connexion a deux états possibles : disponible ou indisponible ;
- Les différents composants réseaux tombent en panne indépendamment l'un de l'autre suscitant des actions de réparation ;
- Des ressources suffisantes sont disponibles pour réparer simultanément n'importe quel nombre de connexions en panne, afin de restaurer leurs chemins. Ceci est connu dans la littérature comme "*unlimited repair*" [J.E 88].
- Pour tous les composants, le temps d'inter-pannes et le temps de réparation sont des processus Markoviens stationnaires indépendants avec des valeurs moyennes connues : Temps moyen d'inter-pannes (Mean Time To Failure, MTTF), et le temps moyen de réparation (Mean Time To Repair, MTTR), respectivement.

Un chemin transportant une connexion t tombe en panne, quand au moins un des composants le long du chemin est défectueux. La contribution du taux de coupure des fibres dans le taux de coupure global du chemin est prédominante, comparée à celles des autres composants. Pour cela et dans un but de simplification, on suppose que le taux de panne λ d'un chemin est équivalent à celui d'une fibre allant de bout en bout et possédant la même longueur que le chemin considéré. En conséquence, pour calculer le taux de panne d'un chemin quelconque, il suffit de multiplier sa longueur par le taux de panne de fibres par unité de longueur (voir Tableau 1).

3.2. Définition et Résolution du Modèle pour le Schéma de Protection Partagée

Considérons N chemins primaires qui partagent le même chemin de secours, c'est à dire un schéma classique de protection partagée 1 :N. Soient $\lambda_i, i = 1, \dots, N + 1$ le taux moyen de panne du i^e me chemin ; $\frac{1}{\lambda_i}$ et $\frac{1}{\mu_i}$ représentent donc, respectivement, le temps moyen d'inter-pannes et le temps moyen de réparation de ce même chemin. D'après les suppositions déjà présentées, tous les pannes sont statistiquement indépendantes, et les temps inter-pannes et de réparation sont exponentiellement distribués. Pour se concentrer sur le comportement du système et selon la littérature existante [D.L 04, J.E 88], on considère un cas d'intérêt où tous les chemins (aussi bien primaire que de secours) ont des taux de panne et de réparation identiques, c'est à dire $\lambda_i = \lambda$ and $\mu_i = \mu, \forall i = 1, \dots, N + 1$. Soit $\rho = \frac{\lambda}{\mu}$. Il s'agit ici d'un problème classique de fiabilité, avec une unité redondante protégeant N unités fonctionnantes. Dans notre cas, une unité désigne un chemin optique. La disponibilité stationnaire A_i d'un chemin déterminé i , représentant la probabilité limite pour ($\tau \rightarrow \infty$) de trouver ce chemin en marche (successfully operating) à l'instant t , peut être calculée comme suit :

$$A_i = \frac{MTTF}{MTTF + MTTR} = \frac{1/\lambda}{1/\lambda + 1/\mu} = \frac{1}{1 + \rho} \quad [1]$$

$\overline{A}_i = 1 - A_i$ représente l'indisponibilité du chemin i .

Soit $F(\tau)$ le nombre de chemins en panne à l'instant t . À cause des suppositions déjà faites, $F(\tau); \tau \geq 0$ forme un processus de Markov continu et stationnaire, avec $F(0) = 0$. soit $p(n)$ la probabilité que $F(\tau) = n$ en régime stationnaire. Le diagramme de transition est représenté dans la Figure 2.

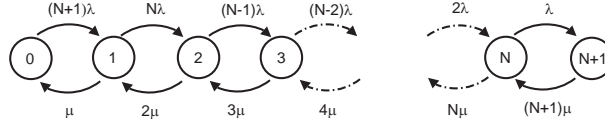


Figure 2. Transition Diagram

Après des calculs classiques, nous pouvons exprimer $p(n)$ la probabilité stationnaire d'un état n de la chaîne de Markov comme suit [D.M 88, J.E 88] :

$$\begin{aligned} p(n) &= C_{N+1}^n \bar{A}^n A^{N+1-n} \\ &= \frac{(N+1)!}{n!(N+1-n)!} \frac{\rho^n}{(1+\rho)^{N+1}} \end{aligned} \quad [2]$$

Où C_{N+1}^n représente le nombre de toutes les combinaisons possibles des n chemins en panne parmi $N+1$, et A est donné par l'équation (1). En d'autres termes, le nombre de chemins en panne suit une distribution binomiale de paramètres $N+1$ et \bar{A} .

Notons que $p(n)$ représente la proportion de temps pendant laquelle il y a n pannes dans le réseau. Lorsque le nombre total de chemins en pannes n est supérieur ou égal à un, nous pouvons distinguer deux cas :

- 1) Le chemin de secours est parmi les n chemins en panne et les $n-1$ connexions restantes ne peuvent pas être restaurés ;
- 2) La totalité des n chemins en panne est constituée de chemins primaires, ainsi, seulement une connexion est restaurée par le chemin de secours, tandis que les $n-1$ connexions restantes ne le sont pas.

Par conséquent, dans de telles conditions, il y aura toujours exactement $n-1$ connexions indisponibles. Pour $n \geq 2$, au moins une connexion est indisponible, alors que lorsque le nombre de pannes n est égal à 1, toutes les connexions sont disponibles. À partir de ce résultat classique, nous nous intéresserons au calcul de l'indisponibilité moyenne d'une connexion spécifique t parmi les N connexions partageant le chemin de secours. L'indisponibilité de t est la proportion de temps où une telle connexion est indisponible pour tous les nombres possibles de panne n , $2 \leq n \leq N+1$. Soit $Y(n)$ l'événement représentant le fait que t est indisponible à l'état n . La probabilité d'avoir notre connexion de référence t indisponible, dans le cas de n chemins en panne, est égale à $p(n)P(Y(n))$. Comme l'expression de $p(n)$ a déjà été déterminée

dans l'équation (2), il nous reste de calculer $P(Y(n))$. Pour ce faire, il faut considérer tous les événements menant à l'indisponibilité de t à l'état n . Ces événements sont les suivants :

- $W(n)$: Le chemin primaire de la connexion t et le chemin de secours sont en panne ;
- $Z(n)$: Le chemin primaire de la connexion t est en panne mais le chemin de secours est disponible.

En se basant sur l'analyse déjà présentée et selon le théorème de probabilités totales, $P(Y(n))$ peut être exprimé comme suit :

$$P(Y(n)) = P(Y(n)|W(n))P(W(n)) + P(Y(n)|Z(n))P(Z(n)) \quad [3]$$

Où $P(Y(n)|W(n))$ et $P(Y(n)|Z(n))$ sont, respectivement, les probabilités conditionnelles d'avoir la connexion t indisponible, étant donné que les événements $W(n)$ et $Z(n)$ sont produits. $P(Y(n)|W(n)) = 1$ car le chemin de secours dans ce cas-ci est en panne et aucune restauration n'est possible ; $P(Y(n)|Z(n)) = \frac{n-1}{n}$ car dans ce cas-ci seulement un des n chemins primaires en panne peut être restauré.

La probabilité d'avoir l'événement $W(n)$ est :

$$P(W(n)) = \frac{C_{N-1}^{n-2}}{C_{N+1}^n} = \frac{n(n-1)}{N(N+1)} \quad [4]$$

Où le numérateur indique toutes les combinaisons de chemins en panne possibles avec la connexion t et le chemin de secours parmi les pannes. Le dénominateur représente le nombre de combinaisons possibles comportant n chemins en panne parmi $N+1$.

La probabilité du $Z(n)$ est :

$$P(Z(n)) = \frac{C_{N-1}^{n-1}}{C_{N+1}^n} = \frac{n(N+1-n)}{N(N+1)} \quad [5]$$

Dans cette équation, le numérateur indique le nombre de combinaison de chemin en panne possibles où le chemin primaire de la connexion t est parmi les pannes, mais le chemin de secours ne l'est pas.

Ensuite, basé sur les équations ci-dessus, la probabilité $P(Y(n))$ que la connexion t soit indisponible à l'état n est égale :

$$P(Y(n)) = \frac{n-1}{N}, \quad 2 \leq n \leq N+1 \quad [6]$$

Il est clair que cette équation est vérifié aussi pour le cas de $n = 1$, pour lequel $P(Y(n)) = 0$, puisque dans ce cas toutes les connexions sont disponibles, comme indiqué précédemment. En appliquant le théorème de probabilités totales, l'indisponibilité d'une connexion dans le cas d'une protection 1 :N classique est donné par la formule suivante :

$$\begin{aligned} U(N, \lambda, \mu) &= \sum_{n=2}^{N+1} p(n) \cdot P(Y(n)) \\ &= \sum_{n=2}^{N+1} p(n) \cdot \frac{n-1}{N} \end{aligned} \quad [7]$$

En remplaçant $p(n)$ par l'expression (1), on obtient :

$$U(N, \lambda, \mu) = \frac{1}{N} \cdot \sum_{n=2}^{N+1} \frac{(n-1) \cdot C_{N+1}^n \cdot \rho^n}{(1+\rho)^{N+1}} \quad [8]$$

La disponibilité moyenne d'une connexion n'est autre que $1 - U(N, \lambda, \mu)$.

3.3. Définition et Résolution du Modèle pour le Schéma à Base de Priorité

Considérons maintenant le système de protection partagée à base de priorité proposé et décrit dans la section 2. Dans notre étude, on considère N connexions qui sont divisées entre 2 classes de priorité C_1 et C_2 , avec N_1 et N_2 connexions appartenant respectivement aux classes C_1 et C_2 , et $N_1 + N_2 = N$. Les connexions de la classe C_1 sont plus prioritaire par rapport aux connexions de classe C_2 vis à vis de l'accès au chemin de secours partagé. Dans ce qui suit, nous dérivons les expressions analytiques liées à la disponibilité de chaque connexion selon sa classe de priorité. On commence tout d'abord par considérer les connexions de priorité haute. En effet, les N_1 connexions ayant la priorité la plus élevée peuvent préempter les connexions de priorité plus basse quant à l'acquisition du chemin de secours. En conséquence, l'analyse du schéma proposé en ce qui concerne les connexions prioritaires se ramène à l'étude d'un schéma partagé 1 : N_1 classique. Par conséquent, on peut dériver directement l'indisponibilité moyenne U_1 des connexions de haute priorité en se basant sur l'équation (8) par une simple substitution de N par N_1 :

$$U_1(N_1, \lambda, \mu) = \frac{1}{N_1} \cdot \sum_{n=2}^{N_1+1} \frac{(n-1) \cdot C_{N_1+1}^n \cdot \rho^n}{(1+\rho)^{N_1+1}} \quad [9]$$

D'une autre part, lorsqu'une connexion de basse priorité tombe en panne, elle devient indisponible si l'une des conditions mutuellement exclusives suivantes est vérifiée :

- 1) Le chemin de secours est déjà en panne ;
- 2) Le chemin de secours est en marche, mais il y a au moins une connexion de haute priorité en panne ;
- 3) Le chemin de secours n'est pas en panne, aucune connexion de haute priorité n'est parmi les pannes, il y a cependant une autre connexion de basse priorité en panne et occupant le chemin de secours.

Soit E_i l'événement correspondant à la vérification de la condition i , $i = 1, 2, 3$. Ainsi, l'étude de l'indisponibilité U_2 d'une connexion de basse priorité consiste à considérer le processus $Q(\tau)$ dont l'état général est un triplet (n_1, n_2, b) , où n_1 et n_2 représentent, respectivement, le nombre de connexions de haute et de basse priorités en panne à l'instant τ , et b est un drapeau (*flag*) positionné à 1 si le chemin de secours est en panne, et à 0 s'il est en marche. $Q(\tau)$ forme un processus de Markov continue et stationnaire, avec une probabilité limite pour chaque état :

$$P(n_1, n_2, b) = P(n_1)P(n_2)P(b) \quad [10]$$

Où $P(n_1)$, la probabilité d'avoir n_1 connexions de haute priorité en panne, et $P(n_2)$, la probabilité d'avoir n_2 connexions de basse priorité en panne, sont respectivement égales à :

$$P(n_1) = C_{N_1}^{n_1} \bar{A}^{n_1} A^{N_1 - n_1} \quad [11]$$

$$P(n_2) = C_{N_2}^{n_2} \bar{A}^{n_2} A^{N_2 - n_2} \quad [12]$$

Et A est donné par l'équation (1). $P(b)$ est la probabilité d'avoir b chemins de secours en panne. En d'autres termes, pour $b = 0$, le chemin de secours n'est pas affecté par une panne, tandis que pour $b = 1$, le chemin de secours est en panne. $P(b)$ est exprimé par :

$$P(b) = \bar{A}^b A^{1-b} \quad [13]$$

Les événements $(E_i, i = 1, 2, 3)$, menants à l'indisponibilité des connexions de basse priorité, seront vérifiés selon les valeurs de n_1, n_2 , et b . Ainsi, $b = 1$ correspond à l'événement E_1 , ce qui signifie que le chemin de secours est en panne; d'autre part, $b = 0$ et $n_1 \geq 1$ correspondent à l'événement E_2 . Enfin, $b = 0$, $n_1 = 0$, et $n_2 \geq 2$ produisent l'événement E_3 . A l'état (n_1, n_2, b) , une connexion spécifique t est indisponible si elle tombe en panne alors que l'un des événements $E_1 - E_3$ est vérifié ou produit. Basé sur cette observation, U_2 est donné par :

$$\begin{aligned}
U_2 &= \sum_{\forall(n_1, n_2, b)} P(t \text{ fails in state } (n_1, n_2, b)) \times \\
&\times P(n_1, n_2, b) \times P(E_1 \cup E_2 \cup E_3)
\end{aligned} \tag{14}$$

Où :

$$P(t \text{ fails in state } (n_1, n_2, b)) = \frac{C_{N_2-1}^{n_2-1}}{C_{N_2}^{n_2}} \tag{15}$$

et $P(E_1 \cup E_2 \cup E_3)$ peut être obtenu via un calcul classique. ce qui donne que U_2 est égal à :

$$\begin{aligned}
U_2 &= \sum_{i=2}^{N_2+1} C_{N_2-1}^{i-2} \bar{A}^i A^{N_2-i+1} + \\
&+ \sum_{i=1}^{N_2} C_{N_2-1}^{i-1} \bar{A}^i A^{N_2-i+1} \cdot (1 - A^{N_1}) + \\
&+ \sum_{i=2}^{N_2} C_{N_2-1}^{i-1} \bar{A}^i A^{N_2-i+1} \cdot A^{N_1} \cdot \frac{(i-1)}{i}
\end{aligned} \tag{16}$$

4. Résultats Numériques

Dans cette section, on montre les avantages du schéma de protection à base de priorité à travers des résultats numériques calculés à partir de l'étude mathématique précédente. Dans un but de simplification, le scénario considéré consiste en 3 connexions primaires partageant un seul chemin de secours. On considère, en premier lieu, le cas d'un schéma de protection à base de priorité, avec une seule connexion primaire de haute priorité et deux connexions de basse priorité. La disponibilité de chaque classe de priorité est calculée pour différentes longueurs de connexions en se basant sur les équations (9) et (14). Les résultats sont montrés en Figure 3. Ensuite, une protection partagée classique est appliquée au même scénario précédent, mais dans ce cas la disponibilité de chaque connexion est évaluée en utilisant l'équation (8). Les résultats correspondants sont de nouveau montrés en Figure 3, afin de pouvoir comparer les divers résultats obtenus. Il est important de noter que le temps moyen de réparation ($\frac{1}{\mu}$) de tous les chemins de connexions est égal à 12 heures (voir Table I).

En se reportant à la Figure 3, on peut observer que la connexion de haute priorité protégée via le schéma à base de priorité présente une disponibilité plus grande que celle résultante de la protection par le schéma partagé classique. Les résultats de

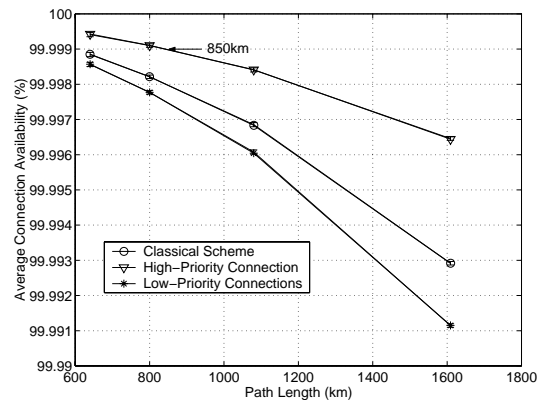


Figure 3. Disponibilité moyenne pour le schéma de protection partagée 1 :3 classique et à base de priorité

disponibilité observés peuvent être interprétés à partir d'une perspective de niveau de qualité de service à travers le raisonnement qui suit. selon [W.F 04], un client *Platinum* requiert une disponibilité de 99.999% (c'`a dire au plus 5 minutes d'indisponibilité par an), alors que un client *Gold* exige une disponibilité de 99.99% par an. En regard de cette terminologie de qualité de service, les classes de haute et de basse priorité correspondent à des niveaux de qualité de service Platinum et Gold [W.F 04] ou à des niveaux plus bas selon la longueur de la connexion en question. En effet, comme le montre la Figure 3, la disponibilité de la connexion de haute priorité devient inférieure à 99.999% quand sa longueur dépasse le 850km. D'autre part, dans le schéma classique, la disponibilité de 99.999% n'est jamais atteinte. Ceci prouve qu'en déployant le schéma proposé, le provisionnement de connexion Platinum devient possible pour les communications à longue distance, trouvées éventuellement dans les réseaux optiques dorsals. En plus, le niveau de qualité de service des connexions Gold est toujours maintenu et respecté. Afin de renforcer l'analyse mathématique, nous avons simulé le scénario précédemment discuté en utilisant un outil de simulation à événement discret [M.V], et les résultats sont, encore une fois, montré en Figure 3. Chaque valeur de disponibilité a été calculé à travers plusieurs simulations pour atteindre des intervalles de confiance de 97.5%. Notons que les résultats de simulation recouvrent pratiquement les résultats analytiques dans chaque situation, renforçant ainsi l'approche analytique.

5. Simulation

Suivant les directives présentées dans [J.Z 03], on considère dans notre simulation la topologie réseau de la Figure 4 ; la disponibilité des fibres est une valeur pré-assignée qui peut être 99.8%, 99.9%, 99.95%, ou 99.995% selon leurs longueurs. Une

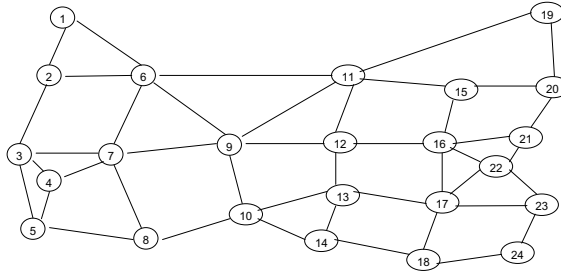


Figure 4. Une topologie réseau exemple.

matrice de trafic de connexions entre toutes les paires de noeuds (c.à dire, nombre total de connexions = 24×23 connexions) est générée aléatoirement. Les exigences en terme de disponibilité des demandes de connexion sont uniformément distribuées entre deux classes : 99.9% ou 99.99%, qui sont désignées comme classes Silver et Gold respectivement. La matrice de trafic est routée dans le réseau selon différents schémas de provisionnement qui adoptent des stratégies de protection distinctes. La disponibilité de chaque connexion provisionnée est ensuite calculée et comparée à la disponibilité requise. Basé sur ceci, le taux de satisfaction de disponibilité résultant de chaque schéma de provisionnement pour les connexions Gold (ASR_G) et Silver (ASR_S) est calculé et rapporté dans le tableau 2. D'ailleurs dans le tableau 2, les performances des différents schémas de provisionnement sont stipulées en terme du nombre de longueurs d'onde sur la fibre la plus congestionnée (W), et le nombre total de longueurs d'onde consommées dans le réseau tout entier (W_{Total}). On compare la performance de quatre schémas de provisionnement différents : *Schéma I (Sans Protection)* où toutes les connexions sont routées selon le chemin le plus court en nombre de sauts en utilisant un simple Dijkstra sans aucune protection et sans aucune considération de disponibilité de connexions. Dans le Schéma II (Protection dédiée), toutes les connexions sont provisionnées selon une protection dédiée (c.à dire protection 1 :1). Le Schéma III consiste à provisionner les connexions selon une protection partagée classique, et enfin, dans le Schéma IV, les connexions sont provisionnées selon le schéma de protection proposé dans cet article.

À partir du tableau 2, on peut observer que le schéma I consomme le moins de ressource comparé aux autres schémas. Mais, dans le schéma I, seulement 5% des connexions Gold et 20% des connexions Silver peuvent atteindre leurs disponibilités requises. Cela est du au fait que le chemin primaire dans le schéma I est calculé selon le nombre minimum de saut, et il peut ne pas être assez fiable. En déployant une pro-

Schéma	ASR_G	ASR_S	W	W_{Total}
Schéma I	5%	20%	94	3352
Schéma II	100%	100%	180	7961
Schéma III	94%	100%	150	6182
Schéma IV	100%	100 %	150	6182

Tableau 2. Résultats des quatres schémas de provisionnement

tection dédiée, comme dans le schéma II, les taux de satisfaction de disponibilité des connexions Gold et Silver (ASR_G , ASR_S) atteignent le 100% ; cependant, une quantité importante de ressources est consommée. En fournissant un schéma de protection partagée classique comme dans le schéma III, une optimisation de l'utilisation de ressources est achevée tout en réalisant des $ASRs$ élevés, mais le taux de satisfaction de la disponibilité des connexions Gold chute en dessous de 100%. Enfin, quand on déploie le schéma de protection à base de priorité proposé dans ce papier (Schéma IV), les taux de satisfaction de la disponibilité pour les connexions Gold et Silver (ASR_G , ASR_S) atteignent le 100% tout en optimisant l'utilisation de ressources par rapport aux autres schémas étudiés.

6. Conclusions et Travaux Futurs

Dans cet article, nous avons proposé une amélioration des schémas de protection partagée existants par l'introduction de priorités relatives parmi les différentes connexions primaire en concurrence pour l'accès au chemin de secours commun. Nous avons présenté un modèle mathématique détaillé aussi bien pour le schéma de protection partagée classique que pour le schéma à base de priorité proposé. Nous avons pu en déduire des expressions analytiques explicites pour la disponibilité moyenne résultante du déploiement de tels schémas. L'élaboration de cette étude nous a permis de montrer que la différenciation de service est mieux réalisée en déployant l'approche proposée. Enfin, à travers une étude simulative, on a prouvé que le schéma proposé réalise des taux de satisfaction élevés en terme de disponibilité tout en garantissant une rentabilité en terme d'usage de ressources dans le réseau. Pour conclure, la proposition du schéma de protection à base de priorité et les modèles étudiés dans ce papier ont une signification générique fondamentale, au delà du contexte spécifique de protection dans les réseaux optique WDM. En effet, ils peuvent être appliqués à n'importe quels systèmes nécessitant une protection. En raison de cette généralisation, tout autre résultat obtenu de notre modèle mathématique aura une signification potentielle dans d'autres champs d'applications.

7. Bibliographie

- [D.L 04] D.LEE, L.LIBMAN, A.ORDA, « Path Protection and Blocking Probability Minimization in Optical Networks », *Proceedings of INFOCOM'04*, 7-11 March 2004.
- [D.M 88] D.MITRA, « Stochastic Theory of a Fluid Model of Producers and Consumers Coupled by a Buffer », *Advances in Applied Probability*, 1988, p. 646-676 vol.20.
- [G.E 01] G.ELLINAS, A.HAILEMARIAM, T.E.STERN, « Protection Cycles in Mesh WDM Networks », *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, October 2001, p. 1924-1937 vol.18.
- [G.M 01] G.MOHAN, S.R.MURTHY, A.K.SOMANI, « Efficient Algorithms for Routing Dependable Connections in WDM Optical Networks », *IEEE/ACM Transactions on Networking*, Oct. 2001, p. 553-566 vol.9.
- [J.E 88] J.E.ANGUS, « On Computing MTBF for a k-out-of-n :G Repairable System », *IEEE Transactions on Reliability*, vol. Vol 37(3), August 1988, p. 312-313.
- [J.Z 03] J.ZHANG, K.ZHU, B.MUKHERJEE, H.ZAN, « A New Provisioning Framework to Provide Availability-Guaranteed Service in WDM Mesh Networks », *Proceedings of IEEE ICC 2003*, Anchorage, Alaska, 11-15 May 2003.
- [M.T 94] M.TO, P.NEUSY, « Unavailability Analysis of Long-Haul Networks », *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 1994, p. 100-109 vol.12(1).
- [M.V] M.VERAN, D.POTIER, *QNAP 2 : A Modeling Language for Mathematical Programming*.
- [S.R 99a] S.RAMAMURTHY, B.MUKHERJEE, « Survivable WDM Mesh Networks, Part II – Restoration », *Proceedings of IEEE International Conference on Communications (ICC '99)*, June 1999, p. 2023-2030.
- [S.R 99b] S.RAMAMURTHY, B.MUKHERJEE, « Survivable WDM Mesh Networks, Part I – Protection », *Proceedings of INFOCOM'99*, March 1999, p. 744-751.
- [S.R 03] S.RAMAMURTHY, L.SAHASRABUDDHE, B.MUKHERJEE, « Survivable WDM mesh networks », *Journal of Lightwave Technology*, April 2003, p. 870-883, vol. 21(4).
- [W.F 04] W.FAWAZ, B.DAHEB, O.AUDOUIN, B.BERDE, M.VIGOUREUX, M.DU-POND, G.PUJOLLE, « Service Level Agreement and Provisioning in Optical Networks », *IEEE Communications Magazine*, June 2004.
- [ZHA 04] ZHANG J., S.MUKHERISE, « A review of fault management in WDM mesh networks : basic concepts and research challenges », *IEEE Network*, March-April 2004, p. 41-48 vol.18(2).