

Université de Montréal

# **Routage adaptatif et qualité de service dans les réseaux optiques à commutation de rafales**

par

Abdeltouab Belbekkouche

Département d'informatique et de recherche opérationnelle

Faculté des arts et des sciences

Thèse présentée à la Faculté des arts et des sciences

en vue de l'obtention du grade de Doctorat

en Informatique

Août, 2010

© Abdeltouab Belbekkouche, 2010

Université de Montréal  
Faculté des arts et des sciences

Cette thèse intitulée :

Routage adaptatif et qualité de service dans les réseaux optiques à commutation  
de rafales

Présentée par :  
Abdeltouab Belbekkouche

a été évaluée par un jury composé des personnes suivantes :

Bernard Gendron, président-rapporteur, représentant du doyen  
de la faculté des arts et des sciences  
Abdelhakim Hafid, directeur de recherche  
Michel Gendreau, co-directeur  
Brigitte Jaumard, membre du jury  
Martin Maier, examinateur externe

## Résumé

Les réseaux optiques à commutation de rafales (OBS) sont des candidats pour jouer un rôle important dans le cadre des réseaux optiques de nouvelle génération. Dans cette thèse, nous nous intéressons au routage adaptatif et au provisionnement de la qualité de service dans ce type de réseaux.

Dans une première partie de la thèse, nous nous intéressons à la capacité du routage multi-chemins et du routage alternatif (par déflexion) à améliorer les performances des réseaux OBS, pro-activement pour le premier et ré-activement pour le second. Dans ce contexte, nous proposons une approche basée sur l'apprentissage par renforcement où des agents placés dans tous les nœuds du réseau coopèrent pour apprendre, continuellement, les chemins du routage et les chemins alternatifs optimaux selon l'état actuel du réseau. Les résultats numériques montrent que cette approche améliore les performances des réseaux OBS comparativement aux solutions proposées dans la littérature.

Dans la deuxième partie de cette thèse, nous nous intéressons au provisionnement absolu de la qualité de service où les performances *pire-cas* des classes de trafic de priorité élevée sont garanties quantitativement. Plus spécifiquement, notre objectif est de garantir la transmission sans pertes des rafales de priorité élevée à l'intérieur du réseau OBS tout en préservant le multiplexage statistique et l'utilisation efficace des ressources qui caractérisent les réseaux OBS. Aussi, nous considérons l'amélioration des performances du trafic *best effort*. Ainsi, nous proposons deux approches : une approche basée sur les nœuds et une approche basée sur les chemins. Dans l'approche basée sur les nœuds, un ensemble de longueurs d'onde est assigné à chaque nœud du bord du réseau OBS pour qu'il puisse envoyer son trafic garanti. Cette assignation prend en considération les distances physiques entre les nœuds du bord. En outre, nous proposons un algorithme de sélection des longueurs d'onde pour améliorer les performances des rafales *best effort*. Dans l'approche basée sur les chemins, le provisionnement absolu de la qualité de service est fourni au niveau des chemins entre les nœuds du bord du réseau OBS. À cette fin, nous proposons

une approche de routage et d'assignation des longueurs d'onde qui a pour but la réduction du nombre requis de longueurs d'onde pour établir des chemins sans contentions. Néanmoins, si cet objectif ne peut pas être atteint à cause du nombre limité de longueurs d'onde, nous proposons de synchroniser les chemins en conflit sans le besoin pour des équipements additionnels. Là aussi, nous proposons un algorithme de sélection des longueurs d'onde pour les rafales *best effort*. Les résultats numériques montrent que l'approche basée sur les nœuds et l'approche basée sur les chemins fournissent le provisionnement absolu de la qualité de service pour le trafic garanti et améliorent les performances du trafic *best effort*. En outre, quand le nombre de longueurs d'ondes est suffisant, l'approche basée sur les chemins peut accommoder plus de trafic garanti et améliorer les performances du trafic *best effort* par rapport à l'approche basée sur les nœuds.

**Mots-clés :** Réseau optique à commutation de rafales; Routage; Assignation des longueurs d'onde; Sélection des longueurs d'onde; Apprentissage par renforcement; Optimisation combinatoire; Recherche avec tabou.

## Abstract

Optical Burst Switching (OBS) networks are candidates to play an important role in the context of next generation optical networks. In this thesis, we are interested in adaptive routing and quality of service provisioning for these networks.

In the first part of the thesis, we study the capability of multi-path routing and alternative routing (deflection routing) to improve the performance of the OBS network proactively for the former and reactively for the latter. In this context, we propose a reinforcement learning-based approach where learning agents, placed in each OBS node, cooperate to learn, continuously, optimal routing paths and alternative paths according to the current state of the network. Numerical results show that the proposed approach improves the performance of the OBS network compared to existing solutions in the literature.

In the second part of the thesis, we consider the problem of absolute quality of service provisioning for OBS networks where *worst-case* performance of high priority traffic is guaranteed quantitatively. Particularly, we are interested in the loss-free transmission, inside the OBS network, of high priority bursts, while preserving statistical multiplexing gain and high resources utilization of the OBS network. Also, we aim to improve the performance of best effort traffic. Hence, we propose two approaches: (a) the node-based approach; and (b) the path-based approach. In the node-based approach, we propose to assign a set of wavelengths to each OBS edge node that it can use to send its guaranteed traffic. This assignment takes into consideration physical distances between edge nodes. Furthermore, we propose a wavelength selection algorithm to improve the performance of best effort bursts. In the path-based approach, absolute quality of service provisioning is offered at end-to-end path level. To do this, we propose a routing and wavelength assignment approach which aims to reduce the number of wavelengths required to establish contention free paths. Nevertheless, if this objective cannot be reached because

of the limited number of wavelengths in each fiber link, we propose an approach to synchronize overlapping paths without the need for additional equipments for synchronization. Here again, we propose a wavelength selection algorithm for best effort bursts. Numerical results show that both the node-based and the path-based approaches successfully provide absolute quality of service provisioning for guaranteed traffic and improve the performance of best effort traffic. Also, path-based approach could accommodate more guaranteed traffic and improve the performance of best effort traffic compared to node-based approach when the number of wavelengths is sufficient.

**Keywords :** Optical Burst Switching (OBS); Routing; Wavelength assignment; Wavelength Selection; Reinforcement learning; Combinatorial optimization; Tabu search.

## Table des matières

|                                                                                                                         |       |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Résumé.....                                                                                                             | i     |
| Abstract .....                                                                                                          | iii   |
| Table des matières.....                                                                                                 | v     |
| Liste des tableaux.....                                                                                                 | ix    |
| Liste des figures .....                                                                                                 | x     |
| Liste des algorithmes.....                                                                                              | xiii  |
| Liste des sigles et abréviations.....                                                                                   | xiv   |
| Remerciements.....                                                                                                      | xviii |
| Chapitre 1 : Introduction .....                                                                                         | 1     |
| 1.1. Contexte et motivations du projet de recherche.....                                                                | 1     |
| 1.2. Contributions et organisation de la thèse .....                                                                    | 7     |
| 1.3. Publications de la thèse .....                                                                                     | 11    |
| Chapitre 2 : Revue de la littérature .....                                                                              | 14    |
| 2.1. Les réseaux optiques à commutation de rafales.....                                                                 | 14    |
| 2.1.1. Architecture et fonctionnement.....                                                                              | 14    |
| 2.1.2. L'assemblage et le désassemblage des rafales .....                                                               | 18    |
| 2.1.3. Signalisation.....                                                                                               | 20    |
| 2.1.4. L'ordonnancement des rafales .....                                                                               | 21    |
| 2.1.5. Résolution des contentions.....                                                                                  | 23    |
| 2.2. Le routage multi-chemins .....                                                                                     | 25    |
| 2.3. Le routage alternatif.....                                                                                         | 31    |
| 2.4. La sélection des longueurs d'onde .....                                                                            | 35    |
| 2.5. Le provisionnement absolu de la qualité de service.....                                                            | 38    |
| Chapitre 3 : Novel reinforcement learning-based approaches to reduce loss probability in buffer-less OBS networks ..... | 46    |
| 3.1. Introduction.....                                                                                                  | 47    |
| 3.2. Related work .....                                                                                                 | 49    |

|                                                                                                                                |                                                                           |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.3.                                                                                                                           | Reinforcement learning.....                                               | 52  |
| 3.4.                                                                                                                           | The proposed deflection routing scheme .....                              | 53  |
| 3.4.1.                                                                                                                         | The proposed scheme.....                                                  | 54  |
| 3.4.2.                                                                                                                         | Exploration, convergence and overhead analysis .....                      | 58  |
| 3.4.3.                                                                                                                         | Insufficient offset time problem.....                                     | 59  |
| 3.5.                                                                                                                           | The proposed multi-path routing approach .....                            | 60  |
| 3.5.1.                                                                                                                         | The routing scheme .....                                                  | 60  |
| 3.5.2.                                                                                                                         | Exploration, convergence and overhead analysis .....                      | 62  |
| 3.5.3.                                                                                                                         | Loopless routing, out-of-order delivery and insufficient offset time..... | 63  |
| 3.6.                                                                                                                           | The integrated approach.....                                              | 66  |
| 3.7.                                                                                                                           | Simulation results and analysis.....                                      | 67  |
| 3.8.                                                                                                                           | Conclusion and future work.....                                           | 74  |
| Chapitre 4 : Topology-aware wavelength partitioning for DWDM OBS networks: A novel approach for absolute QoS provisioning..... |                                                                           | 76  |
| 4.1.                                                                                                                           | Introduction.....                                                         | 77  |
| 4.2.                                                                                                                           | Related work .....                                                        | 79  |
| 4.2.1.                                                                                                                         | Absolute QoS provisioning.....                                            | 79  |
| 4.2.2.                                                                                                                         | Wavelength assignment .....                                               | 81  |
| 4.3.                                                                                                                           | Optimization-based topology-aware wavelength partitioning approach .....  | 82  |
| 4.3.1.                                                                                                                         | OTWP description.....                                                     | 83  |
| 4.3.2.                                                                                                                         | Exact formulation.....                                                    | 85  |
| 4.3.3.                                                                                                                         | Complexity analysis.....                                                  | 88  |
| 4.3.4.                                                                                                                         | Tabu search algorithm.....                                                | 89  |
| 4.4.                                                                                                                           | Absolute fair QoS differentiation scheme.....                             | 93  |
| 4.4.1.                                                                                                                         | The operation of AFQD.....                                                | 93  |
| 4.4.2.                                                                                                                         | Best effort traffic wavelength assignment scheme .....                    | 96  |
| 4.4.3.                                                                                                                         | Starvation problem for BE traffic .....                                   | 97  |
| 4.5.                                                                                                                           | Wavelength borrowing protocol .....                                       | 98  |
| 4.6.                                                                                                                           | Numerical results .....                                                   | 102 |

|                                                                                    |                                                                       |     |
|------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.6.1.                                                                             | Results of CPLEX and tabu search algorithm.....                       | 103 |
| 4.6.2.                                                                             | Results of AFQD.....                                                  | 104 |
| 4.6.3.                                                                             | Results of BETWA .....                                                | 110 |
| 4.6.4.                                                                             | Results of WBP .....                                                  | 113 |
| 4.7.                                                                               | Concluding remarks .....                                              | 115 |
| Chapitre 5 : Path-based QoS Provisioning for Optical Burst Switching Networks..... |                                                                       | 117 |
| 5.1.                                                                               | Introduction.....                                                     | 118 |
| 5.2.                                                                               | Related work .....                                                    | 121 |
| 5.2.1.                                                                             | QoS provisioning .....                                                | 121 |
| 5.2.2.                                                                             | Synchronization in OBS networks.....                                  | 122 |
| 5.3.                                                                               | Path-based QoS provisioning.....                                      | 123 |
| 5.3.1.                                                                             | Overview .....                                                        | 124 |
| 5.3.2.                                                                             | Asynchronous PQP .....                                                | 124 |
| 5.3.3.                                                                             | Synchronous PQP .....                                                 | 125 |
| 5.3.4.                                                                             | Path-based best effort wavelength selection .....                     | 126 |
| 5.4.                                                                               | Routing and wavelength assignment approach.....                       | 127 |
| 5.4.1.                                                                             | Routing paths optimization .....                                      | 127 |
| 5.4.2.                                                                             | Wavelength assignment .....                                           | 131 |
| 5.5.                                                                               | Path-based synchronous transmission scheme.....                       | 136 |
| 5.5.1.                                                                             | Overview .....                                                        | 136 |
| 5.5.2.                                                                             | Capacity constraint problem .....                                     | 137 |
| 5.5.3.                                                                             | The synchronization protocol.....                                     | 142 |
| 5.5.4.                                                                             | Synchronization issues.....                                           | 146 |
| 5.6.                                                                               | Numerical results .....                                               | 146 |
| 5.6.1.                                                                             | Results of ILP models (A, B, C and D) and tabu search algorithm ..... | 148 |
| 5.6.2.                                                                             | Results of asynchronous PQP .....                                     | 151 |
| 5.6.3.                                                                             | Results of synchronous PQP .....                                      | 153 |
| 5.6.4.                                                                             | Results of PBEWS .....                                                | 156 |
| 5.7.                                                                               | Concluding remarks .....                                              | 159 |

|                                                  |     |
|--------------------------------------------------|-----|
| Chapitre 6 : Conclusion et travaux futurs .....  | 160 |
| 6.1. Contributions et résultats de la thèse..... | 160 |
| 6.2. Perspectives et travaux futurs .....        | 163 |
| Bibliographie.....                               | 165 |