

# Le DWDM et les réseaux à intégration de l'avenir

## 1.0 Introduction

Compte tenu de la capacité de transmission d'une seule fibre optique, l'avenir des réseaux de communication passe indubitablement par l'intégration des services. La concurrence qui sévit au sein des réseaux à intégration de services se divise en trois technologies distinctes : le réseau numérique à intégration de services à large bande (RNIS LB) fonctionnant en mode de transfert asynchrone (ATM), la câblodistribution et Internet capable de garantir la qualité de service (QoS). De ces trois technologies, le RNIS LB est la plus mûre et la plus complète. Internet capable de garantir la QoS en est encore à ses balbutiements. Quant à la câblodistribution, elle a été concentrée sur la fourniture d'accès plutôt que sur le réseau de communications mondial. Avec sa principale percée dans la connexion point à point à grande bande passante, le multiplexage dense en longueur d'onde (DWDM) refaçonne le tableau des réseaux de communication. Il est peu vraisemblable que l'avenir des réseaux de communication passe par ces trois types, auxquels s'ajoute la commutation de circuits en réseau optique synchrone (SONET). Chacune de ces technologies devra plutôt se repositionner pour trouver son propre rôle dans l'infrastructure DWDM. Compte tenu de la capacité de transmission de chaque voie de réseau DWDM, l'avenir de cette technologie passe également par l'intégration des services. Pour ce faire, il faudra prévoir le multiplexage à répartition dans le temps (MRT) dans chaque voie et entre ces voies, c'est-à-dire la commutation de circuits en SONET ou la commutation de cellules en ATM. Il s'agira alors de déterminer la forme de MRT qui s'y prête le mieux ainsi que la façon de la mettre en œuvre. Le présent article fait le point sur la technologie DWDM. On y analyse également le rôle futur des protocoles de réseau MRT actuels dans le réseau DWDM de même que l'avenir de l'intégration des services fondée sur cette technologie.

## 2.0 Les réseaux DWDM

### 2.1 Principe et architecture DWDM

Le multiplexage en longueur d'onde repose sur l'envoi d'ondes lumineuses multiples (fréquences) dans une même fibre optique. L'information est transmise par chaque onde, appelée voie, par modulation d'intensité (ou d'amplitude) ou par modulation de phase. À la réception, un prisme optique ou un dispositif semblable sépare les fréquences de manière à extraire séparément l'information transmise par chaque voie. Un signal numérique binaire, plus précisément un signal de modulation d'intensité par tout ou rien, peut également être acheminé par chaque voie individuelle, bien qu'on s'attende à un débit binaire plus faible qu'avec la modulation d'intensité ou de phase. Comme dans le multiplexage par répartition en fréquence (MRF) de type classique utilisé pour les transmissions de signaux électriques ou radio, on peut mélanger les porteuses sur un seul support car la lumière d'une fréquence donnée ne brouille pas celle d'une autre fréquence à l'intérieur de l'ordre linéaire d'approximation.

La figure 1 illustre le principe de base des communications par fibre optique, y compris le DWDM; l'émetteur manipule le signal d'entrée en exerçant une modulation par déplacement d'amplitude (ou d'intensité) (MDA), une modulation par déplacement de fréquence (MDF) ou une modulation par déplacement de phase (MDP) sur une onde porteuse lumineuse de fréquence  $F_s$  et d'une largeur de bande très étroite - une onde laser monofréquence (ou d'une seule couleur). Ce signal modulé est groupé à d'autres signaux émis sur d'autres fréquences, transmis au récepteur par fibre optique, puis reconverti en signal électrique par un détecteur optique et un démodulateur. Des commutateurs ou des routeurs peuvent en outre intervenir entre l'émetteur et le récepteur.

par Shaowen Song,

Université Wilfrid-Laurier, ON

### Abstract

This article provides an overview of the DWDM network and its current technologies. A discussion on DWDM applications and the system requirements, as well as the roles of current network architectures, such as the SONET, ATM and TCP/IP, in the DWDM framework is presented after the overview. An analysis of system requirements for the full optical DWDM integrated services network is then provided.

### Sommaire

Cet article fournit un aperçu du réseau DWDM et de ses technologies actuelles. Une discussion suivra sur les applications DWDM et les caractéristiques de système, ainsi que sur le rôle des architectures de réseau actuelles, telles que SONET, ATM, et TCP/IP, dans la structure du DWDM. Une analyse des caractéristiques de système du réseau DWDM à services intégrés et entièrement optique sera ensuite présentée.

Single frequency laser source	= Onde laser monofréquence
Modulator	= Modulateur
Switches	= Commutateurs
Demodulator	= Démodulateur

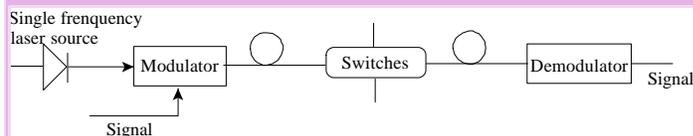


Figure 1 : Principe des communications optiques

La figure 2 décrit l'architecture de base et le fonctionnement d'un réseau DWDM. Ce réseau se compose de nœuds d'extrémité, de nœuds de commutation et de liaisons par fibres optiques. Les nœuds d'extrémité consistent en modulateurs-démodulateurs (ou modems) à chaque voie, ainsi que de multiplexeurs et de démultiplexeurs servant respectivement au groupement et à la séparation des ondes lumineuses de fréquences différentes. Les modulateurs convertissent les données numériques en ondes par modulation d'intensité ou d'amplitude, tandis que les démodulateurs reconvertissent les signaux optiques en données numériques. Les nœuds de commutation se composent de multiplexeurs et de démultiplexeurs à insertion-extraction, de commutateurs de longueur d'onde et de convertisseurs de longueur d'onde. Les multiplexeurs servent à grouper les signaux de longueurs d'onde différentes aux fins de transmission alors que les démultiplexeurs séparent ces mêmes signaux aux fins de commutation. Le commutateur de longueur d'onde interconnecte les voies d'entrée aux voies de sortie voulues. Les convertisseurs de longueur d'onde ont pour fonction de convertir, au sein d'une même fibre optique, les longueurs d'onde surexploitées en longueurs d'onde disponibles de manière à maximiser l'utilisation des voies.

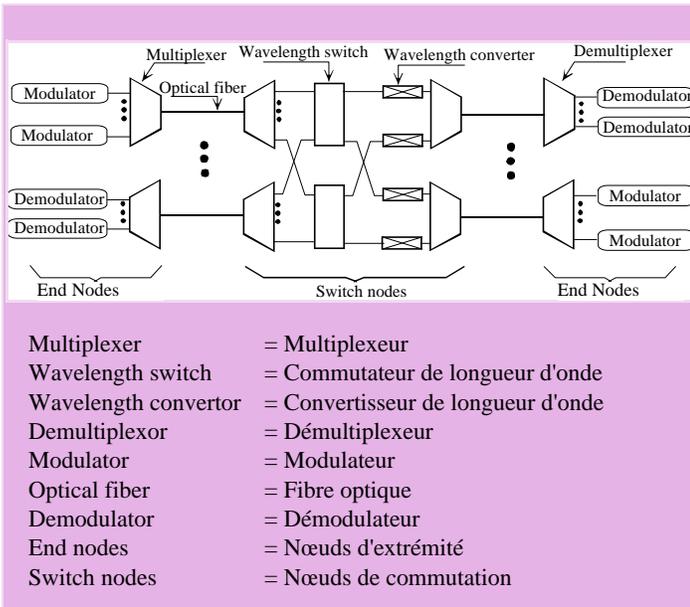


Figure 2 : Principales composantes d'un réseau DWDM

## 2.2 Modulateurs/démodulateurs

Le moyen le plus efficace de moduler et démoduler les signaux consiste à utiliser des lasers à semi-conducteur. La modulation du courant d'attaque d'un laser à semi-conducteur peut produire une modulation de fréquence ou d'intensité selon la configuration du modulateur à semi-conducteur. On peut créer un modulateur de phase tout simple en faisant passer la lumière dans un microguide d'ondes composé d'un matériau électro-optique tel le niobate de lithium, ou  $\text{LiNbO}_3$ . C'est précisément ce qu'illustre la figure 3. L'application de la tension de modulation aux électrodes provoque une variation de la longueur de phase de la voie. Ce type de modulateur peut exiger l'usage d'un amplificateur.

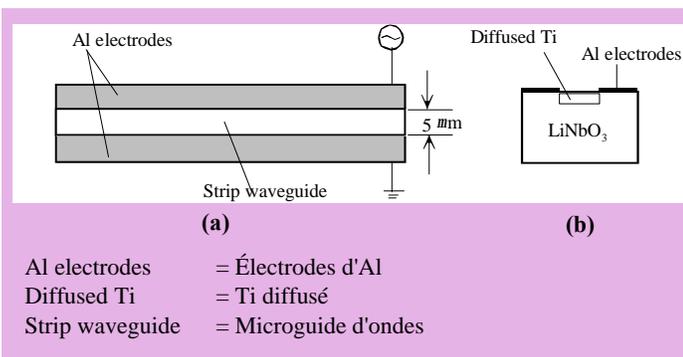


Figure 3: Exemple de modulateur de phase à microguide d'ondes fait de niobate de lithium : a) vue en plan; b) vue en coupe

On peut aussi créer un modulateur d'amplitude (ou d'intensité) à l'aide d'un interféromètre Mach-Zehnder, qui peut, lui aussi, consister en un guide d'ondes dans un matériau électro-optique. C'est ce qu'illustre la figure 4, qui présente une vue schématique. La tension de modulation cause une variation du déphasage relatif entre les deux parcours. Au guide d'ondes de sortie, les deux ondes se regroupent de nouveau comme la somme des deux modes : le mode fondamental, qui est guidé, et le mode d'ordre élevé, qui n'est pas guidé et qui est rayonné. La proportion de puissance dans chaque mode change selon la variation de différence de parcours, modifiant ainsi la puissance de sortie.

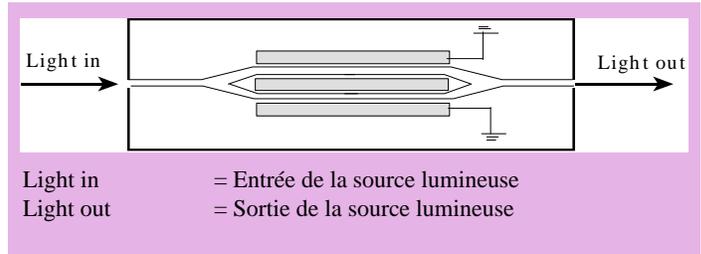


Figure 4: Vue schématique en plan d'un modulateur à interféromètre Mach-Zehnder fait d'un microguide d'ondes au niobate de lithium diffusé

On peut utiliser un interféromètre Mach-Zehnder passif pour convertir la modulation de fréquence en modulation d'intensité. On peut également obtenir une modulation d'intensité par tout ou rien (ou forme d'onde d'impulsion) avec une amplitude réduite du courant de modulation. Au début des années 90, un tel système a fait l'objet d'un essai pratique dans une liaison sous-marine de 132 km de fibre monomode standard. L'interféromètre a produit la modulation d'intensité requise à 1,12 GHz avec une déviation de la fréquence d'entrée de 5 GHz (0,04 nm), la liaison n'étant pas limitée par la dispersion. La fluctuation de longueur d'onde qu'aurait causée la modulation directe de l'intensité du laser à cette fréquence se serait davantage rapprochée des 60 GHz (0,5 nm). Compte tenu d'un coefficient de dispersion de la fibre de l'ordre de 15 ps/(km.nm), une telle modulation aurait produit une valeur efficace de la largeur de dispersion d'environ 1 ns sur les 132 km et aurait donc limité le débit à quelque 250 Mbps.

Utilisés pour grouper ou séparer les voies de longueurs d'onde différentes, les multiplexeurs/démultiplexeurs jouent également un rôle important dans les réseaux DWDM. On en comprend les mécanismes depuis longtemps et on a également créé des dispositifs de divers types en optique. Parmi les principales méthodes sur lesquelles reposent actuellement les multiplexeurs/démultiplexeurs DWDM à usage commercial, on compte les filtres interférentiels à couche mince, les réseaux de Bragg à fibre, les interféromètres Mach-Zehnder à fibre ou à guide d'ondes en cascade, les réseaux de diffraction en substrat, les réseaux de phase (ou phasars) et les méthodes hybrides reposant sur pareilles technologies.

Jusqu'à présent, on a réussi à fabriquer des modulateurs/démodulateurs et multiplexeurs/démultiplexeurs faisant appel à ces méthodes, rendant ainsi possibles les réseaux DWDM point à point. On trouve couramment sur le marché des modèles de modulateurs/démodulateurs et multiplexeurs/démultiplexeurs. Plusieurs entreprises de télécommunications ont mis sur pied des réseaux DWDM utilisés pour les transmissions point à point, notamment Nortel Networks. Entre-temps, le nombre de voies et leur débit ont connu une croissance exponentielle. JDS Uniphase, fabricant de matériel de télécommunications à fibres optiques d'Ottawa, a fait l'annonce d'un multiplexeur/démultiplexeur à 80 voies espacées de 50 GHz qui recourt à la technologie améliorée d'intercalage des fréquences [1]. À l'événement TELECOM99 qui s'est tenu à Genève en octobre 99, Nortel Networks a fait la démonstration de sa plateforme à 6,4 téraoctets par seconde, considérée la plus rapide à ce jour [2].

## 2.3 Commutation/routage DWDM

Une fonction de routage toute simple qu'on propose d'ajouter au réseau DWDM point à point consiste en une opération par diffusion et sélection dans laquelle chaque utilisateur du réseau transmet son signal à un coupleur en étoile, d'abord utilisé pour répartir ces signaux vers tous les autres nœuds du réseau de manière passive. Il faut utiliser un protocole d'accès au support pour contrôler les transmissions aux divers nœuds du réseau afin d'éviter les collisions et de gérer les conflits dans la largeur de bande. Ce type de réseau pourrait s'avérer attrayant par sa simplicité et sa performance puisqu'il ne comporte ni commutateur ni routeur; par

contre, comme il existe une relation linéaire entre le nombre de nœuds et le nombre de longueurs d'onde, un tel réseau ne peut évoluer pour comporter une multitude de nœuds. Les travaux se poursuivent dans ce domaine en vue de l'interconnexion des ordinateurs de réseaux locaux et métropolitains. Il n'en reste pas moins qu'une telle application n'est pas possible dans un grand réseau car elle ne se prête pas à une mise à l'échelle convenable [3].

La capacité de routage du DWDM passera d'abord par le routage des longueurs d'onde, qui fait actuellement l'objet de recherches. Il s'agit d'un routage sélectif des signaux optiques en fonction de leur longueur d'onde lors de leur cheminement dans les éléments de réseaux situés entre l'émetteur et le récepteur. Le routage des longueurs d'onde a deux grandes caractéristiques. D'abord, il détermine la raie spectrale du signal optique et, en cas d'émission de signaux multiples à partir d'un même nœud, chaque signal peut être destiné à un récepteur distinct. Le nombre de pareils récepteurs est égal au nombre de longueurs d'onde produites dans chaque nœud. Ensuite, comme chaque signal est limité à une raie spectrale donnée, il est possible de réutiliser chaque longueur d'onde nombre de fois dans des raies différentes appartenant au réseau dans la mesure où aucune de ces diverses raies ne tente de coexister dans la même liaison par fibres optiques. La figure 2 illustre schématiquement un tel nœud de commutation par convertisseur de longueurs d'onde en vue de la réutilisation des longueurs d'onde. Grâce à une telle interconnexion de longueurs d'onde, on peut interconnecter n'importe quelle longueur d'onde d'entrée à n'importe quelle fibre d'entrée et n'importe quelle longueur d'onde de sortie à n'importe quelle fibre de sortie, pourvu que la fibre en question comporte un nombre de voies suffisant. Ce commutateur réussit partiellement le multiplexage en longueur d'onde et le multiplexage spatial (entre liaisons optiques).

Ce commutateur d'interconnexion DWDM - et le multiplexeur à insertion-extraction qui y est associé - tire toute son importance du fait qu'il permet la reconfiguration du réseau optique par longueur d'onde, de manière à optimiser le trafic, l'encombrement, la croissance et la pérennité du réseau. Il permet en outre de configurer des circuits spéciaux en vue de la transmission de signaux sous une autre forme. Pareil ensemble de commutateur-multiplexeur DWDM constitue l'élément transparent de la transmission par sélection de longueurs d'onde qui s'avère essentiel à la création de réseaux à longueurs d'onde multiples.

### 3.0 Applications du DWDM dans un proche avenir

La première des applications du DWDM est la dorsale de transmission point à point, qui est actuellement déployée dans nombre de cas. On peut également l'appliquer à divers protocoles et structures de réseau, tels le réseau optique synchrone à circuits commutés (SONET, connu sous l'appellation hiérarchie numérique synchrone (SDH) en Europe), le réseau Internet fondé sur le protocole TCP/IP, le réseau intranet faisant appel au protocole TCP/IP ou à l'ATM, etc. Les applications du DWDM point à point accroîtront la capacité de transmission des liaisons à fibres optiques existantes de manière spectaculaire, ce qui pourra réduire les coûts des réseaux. Le réseau de câblodistribution semble toutefois ne pas profiter de cette évolution du DWDM. Il serait possible de remplacer les câbles coaxiaux par des câbles optiques et d'exploiter un réseau DWDM pour les services de télédiffusion en transmettant la programmation d'une ou plusieurs chaînes sur une longueur d'onde, mais les coûts impliqués pourraient constituer le facteur déterminant.

Les technologies d'interconnexion entre les réseaux et protocoles existants, d'une part, et les dorsales DWDM point à point, d'autre part, en sont à l'étape de développement. Certaines d'entre elles sont déjà offertes à l'échelle commerciale. Nul obstacle technologique n'entrave l'érection d'une interface entre le réseau DWDM et la plupart des réseaux déjà en place. L'élaboration de produits suit son cours dans ce domaine.

La deuxième étape de l'application du DWDM consistera à ajouter des commutateurs/routeurs optiques aux dorsales DWDM. À cette étape, l'architecture et le protocole du réseau détermineront les coûts, voire la possibilité, de mise en place des commutateurs/routeurs. Compte tenu des mécanismes des réseaux actuels, y compris les réseaux SONET, Internet, ATM et de câblodistribution, SONET sera le fer de lance à

cette étape en raison de la simplicité de ses mécanismes de commutation et de multiplexage à répartition dans le temps (MRT) comparativement aux mécanismes des autres technologies. On peut prévoir que les commutateurs électriques numériques et les multiplexeurs à répartition dans le temps seront remplacés par leurs équivalents de type optique, mais qu'il s'avérera beaucoup plus difficile de remplacer les routeurs d'Internet et les commutateurs des réseaux ATM puisque leur commande exige un niveau d'intelligence plus élevé pour faire fonctionner les protocoles. Par conséquent, on peut s'attendre à un réseau SONET ou SDH entièrement optique dans un avenir assez rapproché, mais il faudra sans doute attendre plus longtemps pour voir un réseau à commutation de paquets entièrement optique.

### 4.0 Réseaux DWDM entièrement optiques et intégration de services

Après l'avènement du réseau SONET à circuits optiques, la commutation/routage de paquets dans un réseau à intégration de services entièrement optique constituerait un autre développement possible. La comparaison des technologies ATM et TCP/IP indique que l'ATM est nettement mieux adapté puisque TCP/IP n'offre pas la possibilité de communications en temps réel. Néanmoins, on mène actuellement des recherches dans le milieu afin de rendre Internet capable de garantir la qualité de service (QoS). Compte tenu que la dorsale DWDM sera en place dans un avenir rapproché et qu'elle permettra l'utilisation d'une largeur de bande beaucoup plus importante par les routeurs, la recherche sur la prochaine génération Internet en temps réel connaîtra un nouvel élan. La capacité des routeurs électroniques constitue la principale source d'étranglement; elle risque de retarder voire d'empêcher la mise en œuvre et l'essai de protocoles TCP/IP capables de garantir la qualité de service.

L'unité de commande du commutateur chargé d'exécuter les protocoles constitue l'un des grands obstacles à l'avènement des commutateurs ATM entièrement optiques. En matière de mise en œuvre de la commutation fondée sur la technologie optique, on en est dans ce domaine au même point qu'avec SONET. La mise en œuvre de l'unité de commande exige que le traitement logique passe par la lumière. Or, la technologie voulue pour un tel traitement n'existe pas pour le moment, bien qu'elle soit théoriquement possible.

En présumant qu'une technologie entièrement optique pour prendre en charge les protocoles TCP/IP capables de garantir la qualité de service soit maintenant à point, elle exige l'utilisation d'ordinateurs entièrement optiques. Voilà qui sous-entend une révolution dans le domaine de la conception et de la fabrication des ordinateurs, mais une telle révolution paraît possible. TCP/IP en mode ATM pourrait aussi trouver ses applications dans un réseau ATM entièrement optique mis en œuvre avec un réseau DWDM.

### 5.0 Conclusion

Cet article a donné un aperçu des réseaux DWDM et de leurs applications actuelles. On y a également fait l'analyse des applications et du rôle des protocoles de réseau courants dans la structure future du DWDM. D'évidence, le DWDM refaçonnera les réseaux de communication, mais les architectures et protocoles de réseau actuels auront également un rôle à jouer dans la structure à venir des réseaux DWDM. Compte tenu de la simplicité de commutation et de la capacité de transmission que présente le DWDM, SONET pourrait fort bien constituer la première structure de réseau entièrement optique. Bien que l'ATM perde de la popularité parce que le RNIS LB ne parvient pas à s'imposer, ce mode de transfert faisant appel au DWDM pourrait susciter un regain d'intérêt dans le contexte des réseaux à intégration de services.

### 6.0 Références

- [1]. J.Xie, P.Colbourne, N.J. Copner, B.P. Keyworth, A.D. Cohen, J.B. Philipson et M.C. Farries (1999), « High-channel-count 50-GHz-spaced DWDM Using Optical Frequency Interleaving Technology », Actes de la troisième conférence sur la recherche dans le domaine des larges bandes, Ottawa, Canada, pp. 237.1-237.3.

- [2]. Communiqué de presse de Nortel Networks (1999), « Nortel Networks Breaks Own 'Land Speed Record' Using Light -- Redefines Speed of Internet & Networking », <http://www.nortelnetworks.com/corporate/news/newsrelease>.
- [3]. Charles Brackett (1996), « Foreword : Is There an Emerging Consensus on DWM Networking? » *Journal of Lightwave Technology*, vol. 14, no 6, juin 1996, p. 936-941.

#### 4.0 Acronymes

ATM	- mode de transfert asynchrone
DWDM	- multiplexage dense en longueur d'onde
MRF	- multiplexage par répartition en fréquence
MRL	- multiplexage par répartition en longueur d'onde
MRT	- multiplexage à répartition dans le temps
QoS	- qualité de service
RNIS LB	- réseau numérique à intégration de services à large bande
SDH	- hiérarchie numérique synchrone
SONET	- réseau optique synchrone
TCP/IP	- protocole de contrôle de transmission/protocole Internet

#### À propos de l'auteur

**Shaowen Song** est actuellement professeur adjoint au département de physique et de calcul à l'Université Wilfrid-Laurier à Waterloo (Ontario) au Canada. Il occupait auparavant le même poste au département de mathématique et d'informatique de l'Université de l'Île-du-Prince-Édouard (IPE) au Canada.



Il détient un baccalauréat ès sciences (génie électrique) et une maîtrise ès sciences (mathématiques appliquées) de l'université Tianjin, en Chine, et a obtenu un doctorat en génie de l'Université Memorial (Terre-Neuve).

Au nombre des sujets de recherche qui retiennent son intérêt, on compte les réseaux d'accès à large bande, les passerelles résidentielles, la logique et l'informatique optiques ainsi que les réseaux DWDM. Il est membre de l'IEEE et de l'IEEE Communications Society.