

Commutation optique et réseaux

André Chomette
Philippe Gravey

André Chomette, X70, ENST 75, Docteur en physique, est responsable du groupement "Réseaux Intégrés Optiques" au centre Lannion B du CNET. Il s'intéresse à la transmission et à la commutation optiques ainsi qu'aux évolutions des réseaux de télécommunication entraînées par l'introduction de nouvelles fonctions optiques.

Philippe Gravey, X75, ENST 80, est responsable du département "Processeurs de Commutation Optique" au centre Lannion B du CNET. Il s'intéresse aux différents aspects de la commutation optique, en particulier à l'étude de dispositifs d'interconnexion optique en espace libre ainsi qu'aux matériaux holographiques adaptés à ces applications.

Commutation optique et réseaux

***Clef de la “connexité optique”,
la commutation optique se
situe au carrefour de trois
axes de recherche :
la conception des réseaux,
l'architecture des machines de
commutation et la technologie
des points de connexion.***

L'optique est désormais la technique privilégiée en transmission, aussi bien terrestre que sous-marine : des milliers de kilomètres de fibres optiques sont installés, qui transportent des débits de plus en plus importants, jusqu'à 2,5 Gbit/s pour l'instant et bientôt 10 Gbit/s et au-delà. Par ailleurs, la pénétration massive de l'optique dans les réseaux de distribution, qui relie les clients aux commutateurs, est un des enjeux principaux des années à venir. En témoignent les nombreuses expérimentations en cours dans le monde et en particulier à France Télécom (ROF = Raccordements Optiques Flexibles et RDFO = Réseaux de Distribution sur Fibres Optiques). Il est donc logique de s'interroger sur la place future de l'optique dans le troisième des grands secteurs traditionnels des télécommunications, la commutation.

Pour l'instant, les noeuds de commutation fonctionnent tous avec des signaux électriques, à relativement bas débits. L'extension de l'optique dans le transport des signaux et la montée en débit impliquent donc une multiplication du nombre des conversions optoélectroniques et électro-optiques ainsi que des opérations de multiplexage et démultiplexage. Les nombreuses études menées dans le monde sur la commutation optique ont pour objectif de simplifier ces opérations et de permettre le développement de réseaux à large bande, dans des conditions économiques satisfaisantes.

Après un rappel des applications potentielles de la commutation optique, nous envisagerons les diverses voies technologiques possibles ainsi que les fonctions optiques indispensables à un développement significatif de la commutation optique. Nous terminerons par un bref panorama des études à France Télécom.

La commutation optique dans les réseaux

Applications potentielles

La protection, ou sécurisation, des liaisons de transmission à haut débit constitue l'application la plus simple de la commutation optique. Il s'agit, en cas de défaillance ou de défaut d'une liaison de transmission, de détecter le défaut ou la dégradation puis de basculer le trafic transporté par cette liaison sur une liaison de secours. Les matrices à réaliser sont de petites tailles (10×10 au maximum), les temps de commutation sont, en général, assez longs (de l'ordre de la seconde).

Les autres applications, dans les réseaux de télécommunications, sont nettement plus complexes, soit par la taille des matrices mises en jeu, soit par les temps de reconfiguration nécessaires. Ces applications visent à réaliser des fonctions de réseau que l'on peut classer par complexité décroissante du point de vue de la commutation optique :

- la commutation proprement dite (au sens traditionnel de commutateur d'abonnés ou de transit ou de commutateur de paquets), qui représente le problème le plus complexe puisqu'il faut traiter un très grand nombre d'entrées-sorties (quelques milliers ou plus) et, dans le cas d'une commutation temporelle, avoir accès aux éléments binaires correspondant à chaque communication. Ceci implique des temps de commutation élémentaires inférieurs à la microseconde ou même à la nanoseconde ;

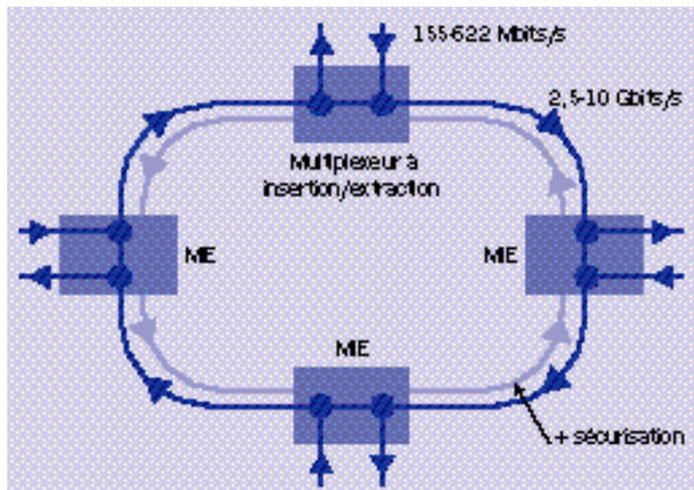


Figure 1 - Boucle haut débit avec insertion-extraction.

- le brassage, qui correspond au mélange, entre les différents multiplex entrant dans le brasseur et les multiplex qui en sortent, des affluents, ou trains de débits inférieurs, qui composent ces multiplex. Cette fonction s'apparente à la commutation proprement dite, mais avec des dimensions de matrices sensiblement inférieures (quelques centaines) ;
- l'insertion-extraction, cas particulier de brassage, qui consiste à pouvoir extraire et insérer, en un point d'une liaison de transmission, un ou plusieurs affluents. Cette fonction est particulièrement utile dans les architectures en boucle. La figure 1 donne un exemple d'une boucle sécurisée, à haut débit, dans laquelle on souhaite, en plusieurs points, extraire et insérer des débits plus faibles, par l'intermédiaire d'équipements appelés multiplexeurs d'insertion-extraction ;

- la répartition qui consiste à pouvoir connecter n'importe quelle liaison d'un faisceau entrant sur n'importe quelle liaison d'un faisceau sortant, sans modifier les signaux transportés par ces lignes. Cette fonction sert à reconfigurer un réseau de transmission en fonction de l'état du réseau ou des variations de trafic, donc la vitesse de commutation n'est pas, en général, un paramètre critique. Le nombre d'entrées-sorties peut atteindre 512 ou plus. En plus des applications énumérées précédemment, qui concernent des fonctions du réseau, il existe d'autres applications très importantes de la commutation optique : les interconnexions optiques reconfigurables, qui sont étudiées pour régler les problèmes posés par les interconnexions électriques multiples et à hauts débits entre bâtis ou entre cartes ou entre puces. Bien que certaines technologies étudiées dans ce cadre puissent également être utilisées pour réaliser des fonctions de commutation "réseau", nous excluons ces problèmes d'interconnexion de la présente contribution.

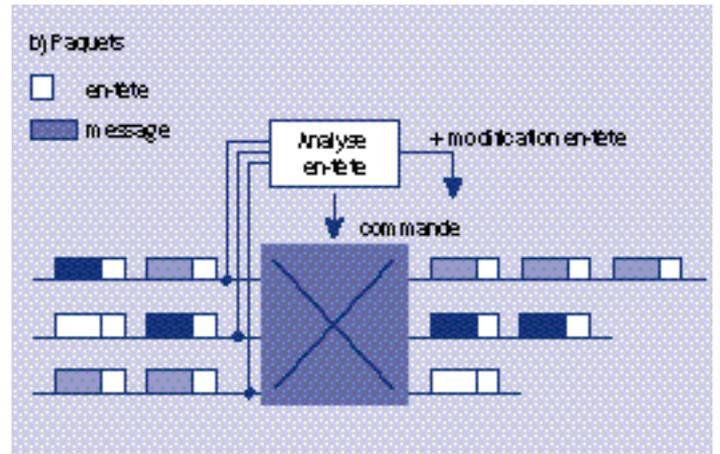
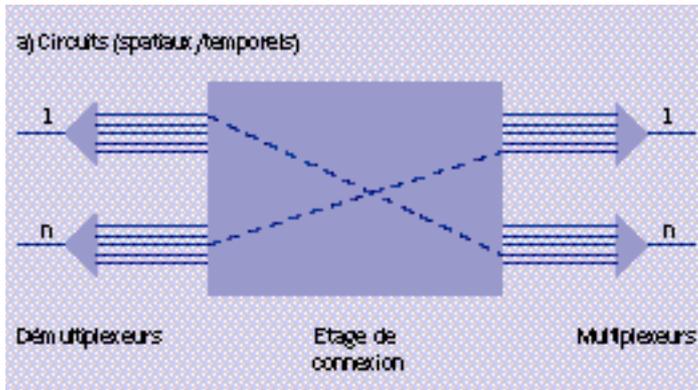


Figure 2 - Principe de la commutation de circuits et de la commutation de paquets.

Paramètres principaux pour un commutateur optique

Les diverses applications de la commutation optique peuvent être classées en fonction d'un petit nombre de critères. En fait, la distinction traditionnelle entre transmission et commutation a tendance à s'estomper, dans la mesure où des fonctions de commutation (brassage automatique) s'introduisent en transmission.

Parmi les critères pertinents, le temps de reconfiguration total (t_c) de la machine de commutation, c'est-à-dire le temps mis pour changer de configuration entre les entrées et les sorties, est probablement le plus important. On distingue entre commutation lente, où le processeur est régi par l'administration du réseau, (t_c typiquement plus grand que la milliseconde ou quelques centaines de microsecondes) et commutation rapide, où le processeur se reconfigure au rythme des trames ou des paquets (t_c de l'ordre de quelques microsecondes ou inférieur). Ce temps de reconfiguration impose évidemment des contraintes sur les temps de commutation élémentaires des points de connexion.

Une deuxième distinction importante tient à la nature des signaux à commuter, paquets ou circuits :

- en mode paquet (figure 2b), les signaux se présentent sous la forme de paquets d'éléments binaires de longueur fixe (exemple de la cellule ATM*) ou variable (liaisons informatiques) qui doivent être aiguillés au rythme de leur arrivée. Un traitement logique de l'en-tête, qui transporte l'adresse du paquet, est alors nécessaire pour connaître l'acheminement du message. Le chemin physiquement établi à l'intérieur du commutateur est alors maintenu pendant le temps correspondant à la charge utile transportée par le paquet. Un autre traitement logique peut aussi être nécessaire pour transformer l'adresse du paquet en vue de son traitement par le processeur suivant. L'architecture du commutateur doit également résoudre les conflits d'adresse (cas de deux paquets destinés à la même sortie, au même moment) ;
- en mode circuit (figure 2a), le signal est commuté entre une entrée et une sortie fixées pendant le temps d'une communication : le chemin entre l'entrée et la sortie peut être soit physiquement maintenu pendant toute la durée de la communication (cas d'un multiplex fréquentiel), soit périodiquement réétabli, à la fréquence trame, pendant la durée d'un élément binaire (cas d'un multiplex temporel). Dans ce dernier cas on parle

de commutation numérique ou commutation temporelle.

Un autre paramètre évident et fondamental est la taille de la matrice totale de commutation à réaliser, qui peut varier de quelques entrées-sorties à quelques centaines ou milliers d'entrées-sorties, et même éventuellement beaucoup plus.

Electronique et transparence optique

Toute discussion sur la commutation optique amène inévitablement la comparaison entre les possibilités respectives de l'électronique et de l'optique. Un argument fréquemment avancé en faveur d'une future commutation optique dans un réseau à large bande est celui du "goulot d'étranglement de l'électronique dans les hauts débits". A partir de quelques centaines de Mbit/s, les composants électroniques ne peuvent plus être largement intégrés, ce qui restreint les possibilités de traitement électronique dont on aurait justement besoin pour les débits de 1 Gbit/s ou plus que les systèmes de transmission optique peuvent acheminer.

* ATM : Asynchronous Transfer Mode.

Cependant, cet argument du “goulot d'étranglement de l'électronique” doit être manié avec précaution dans la mesure où, d'une part, les progrès de l'électronique sont d'une régularité impressionnante et où, d'autre part, un certain nombre de circuits optiques ont une commande électronique et sont donc soumis aux limitations de l'électronique. Il est donc évident que la conception des nœuds de commutation optique ne doit pas être une simple copie de celle des nœuds électroniques mais doit s'appuyer sur les propriétés spécifiques de l'optique : parallélisme, interactions nulles entre photons, dimension fréquentielle. Par ailleurs, la faible maturité actuelle des circuits et composants optiques est contrebalancée par la vitesse d'évolution de ces technologies comme en témoigne, par exemple, l'introduction récente et massive des puits quantiques et des technologies d'ingénierie de bandes dans les lasers et amplificateurs optiques.

Un autre argument fréquemment avancé en faveur de la commutation optique mérite quelques considérations : celui de la transparence optique, qui prend parfois un caractère dogmatique. La notion même de transparence optique est ambiguë : au sens strict, elle est pratiquement équivalente à celle de linéarité ; dans un sens élargi, que nous utiliserons le plus souvent, on dira qu'un canal de transmission est optiquement transparent s'il est capable de transporter et manipuler des signaux de débits différents.

L'établissement de connexions n'utilisant que des systèmes à fibres optiques, en transmission et dans le réseau local, nécessitera un grand nombre de conversions optiques-électroniques et électroniques-optiques. La suppression de ces multiples conversions paraît donc séduisante d'un simple point de vue économique, même si l'on n'imagine pas, pour l'instant, d'application “service” directe de la transparence optique.

Cet optimisme doit être tempéré par la prise en compte de certaines propriétés fondamentales d'un réseau de télécommunication : la surveillance de la qualité et la gestion du réseau. L'exemple de la SDH montre que les trames transportent un surdébit, par rapport au débit de transmission proprement dit, dont la fonction est de permettre cette surveillance et cette gestion. Tant que l'optique ne sera pas capable de gérer ces informations, les conversions électro-optiques resteront indispensables, à moins, de nouveau, de repenser la conception de certaines parties du réseau en fonction des propriétés de l'optique.

Néanmoins, la transparence optique reste intéressante dans certains éléments du réseau (nœuds ou liens) pour pouvoir facilement, soit augmenter les débits véhiculés sans avoir à changer les équipements installés (exemple des réseaux optiques passifs, “PON” en anglais), soit traiter simultanément plusieurs débits différents. En transmission, un exemple remarquable est fourni par les amplificateurs à fibre dopée, indépendants du débit de transmission, appelés à remplacer les répéteurs-régénérateurs qui, eux, sont étroitement liés au débit puisque le signal est traité bit à bit. D'autres applications, comme les boucles optiques ou les réseaux “gigabits”, peuvent nécessiter des points de traitement ou de commutation optiques transparents.

Les différents niveaux de recherche

Un nœud de commutation optique se compose de deux parties principales : le réseau de connexion et l'unité de commande. Le réseau de connexion peut se représenter sous la forme d'une matrice dont la fonction est de commuter N entrées sur M sorties et les divers chemins à l'intérieur de cette matrice sont réalisés par la configuration des points de connexion. L'unité de commande permet, entre autres choses, de piloter cette configuration des points de connexion et, bien évidemment, leur reconfiguration en temps réel, où l'on entend par temps réel le rythme imposé par l'application traitée.

L'unité de commande joue un rôle fondamental puisqu'elle fait le lien entre, d'une part, l'architecture et l'organisation du réseau comprenant le nœud de commutation et, d'autre part, la technologie de réalisation du réseau de connexion. Par conséquent, trois types d'études sont nécessaires pour faire évoluer la commutation optique :

Les études des points de connexion optiques

L'optique apporte une dimension supplémentaire par rapport à l'électronique : la variation de longueur d'onde. Trois types élémentaires de points de connexion optiques peuvent donc être utilisés, concurremment ou de manière complémentaire :

- le point de connexion optique spatial, qui correspond à la déviation d'un flux de photons d'un “tuyau” d'entrée vers un “tuyau” de sortie, ces tuyaux pouvant être des fibres, des guides ou des directions de l'espace ;
- le point de connexion optique fréquentiel, qui consiste à modifier la longueur d'onde du signal optique ;
- le point de connexion optique temporel, qui réalise un déplacement des éléments binaires composant le signal d'un intervalle de temps à un autre.

Nous reviendrons plus en détail, dans le chapitre suivant, sur les diverses techniques étudiées.

Les études sur les réseaux et leur évolution vers des réseaux optiques

Il est évident qu'il existe une interaction forte entre l'organisation d'un réseau et la façon dont sont réalisés les divers nœuds qui le composent. Le réseau actuel s'est construit, au fil des années, indépendamment de l'optique et de ses propriétés : il est fortement marqué par l'électronique.

Si l'on veut simplement remplacer une de ses briques par une réalisation optique, cette logique de l'électronique continuera à s'imposer, ce qui représente une pénalisation pour l'optique. Il est probable qu'un réseau conçu dès l'origine avec des technologies optiques mûres aurait une structure profondément différente : un exemple caractéristique est fourni par les techniques multicolores. Il est beaucoup plus simple de traiter ou commuter optiquement des affluents multiplexés en longueurs d'onde que des affluents multiplexés temporellement. Ceci implique que la transition vers un réseau tout optique, si elle a lieu, devra être gérée avec beaucoup de soins. Cela signifie également que, dans les cas où la structure du réseau peut évoluer (exemple du niveau inférieur du réseau de transmission), ou bien même est à créer (exemple des réseaux locaux à très hauts débits), les nœuds de commutation doivent être étudiés en même temps que la topologie et la gestion du réseau.

Sans développer ici ce point très important des recherches sur les réseaux optiques, on peut indiquer que les publications actuelles et un certain nombre de démonstrations en cours s'orientent essentiellement dans deux directions, souvent complémentaires : l'utilisation des techniques multicolores (plusieurs longueurs d'onde) et le transport et le traitement des paquets optiques rapides (avec des débits d'au moins 1 Gbit/s). Un exemple très étudié est représenté par les réseaux optiques à déflexion de paquets de type "Manhattan Street" qui s'appuient sur un grand nombre de petits nœuds de commutation simples (donc adaptés à l'optique) et distribués, avec un poids nul ou faible de la fonction mémoire, grâce à des algorithmes de routage par déflexion.

Les études sur l'architecture des nœuds de commutation optique

Une fois choisies la topologie et l'organisation du réseau et en utilisant les technologies d'interconnexion adaptées, il s'agit de définir la structure du nœud de commutation sous forme d'une machine complète, en prenant en compte les entrées et sorties avec des démultiplexages et multiplexages, la reconnaissance d'adresse lorsque l'on traite des paquets, l'acheminement dans le réseau de connexion, la surveillance de la qualité...

La réalisation pratique d'un réseau de connexion électronique se fait généralement sous forme d'étages, chaque étage comportant plusieurs matrices de commutation de type spatial (S) ou de type temporel (T). Dans la succession des étages, on mélange souvent les deux types pour aboutir à des structures de type TS, TST, TSST,... En commutation optique, les mêmes principes seront appliqués, avec succession d'étages de type spatial, temporel et fréquentiel. On retrouve également les mêmes problèmes d'organisation de chaque étage en réseau de points de connexion bloquant ou non bloquant, avec possibilité de diffusion ou non... Et les solutions sont du même type que pour les réseaux de connexion électronique.

L'unité de commande restera très probablement électronique, avec des interfaces optoélectroniques pour l'analyse des entrées et le pilotage du réseau de connexion.

Finalement ces études d'architecture de nœuds de commutation optique ne sont pas fondamentalement différentes de celles qui ont été menées pour réaliser les machines de commutation électronique. Elles doivent simplement prendre en compte à la fois de nouvelles topologies de réseaux, les contraintes de vitesse imposées par les réseaux à large bande et les caractéristiques et limitations des composants optiques.

Les différentes voies technologiques

Les trois domaines recensés précédemment (réseaux optiques, nœuds de commutation et points de connexion) sont l'objet d'importants efforts de recherche chez les opérateurs, chez les constructeurs et dans les laboratoires universitaires. Il est évident que ces trois types de recherches sont indispensables aux progrès de la commutation optique. Cependant, pour limiter le champ de cette contribution, nous allons nous restreindre, dans ce chapitre, au domaine des réseaux de connexion et donner quelques indications sur les diverses voies technologiques qui restent ouvertes, aussi bien en spatial, qu'en fréquentiel et en temporel. Nous terminerons par une petite synthèse mettant en correspondance les applications et les solutions technologiques possibles, dans les deux grandes catégories de commutation optique lente et de commutation optique rapide.

Commutation optique spatiale

Si l'on exclut les commutateurs optomécaniques qui impliquent des déplacements de fibres ou d'optiques et dont il existe des réalisations commerciales pouvant convenir à des applications très limitées, avec des temps de commutation très longs (0,1 à 1 s), deux grandes voies s'offrent à la commutation optique spatiale : la commutation en optique guidée et la commutation utilisant la propagation libre dans l'espace.

Réseaux de connexion en optique guidée

Les technologies utilisées pour la commutation en optique guidée sont dans la lignée, maintenant bien établie, de l'optoélectronique et profitent donc de tous les progrès rapides qu'elle enregistre. Il s'agit de rassembler des composants actifs, comme les amplificateurs ou les modulateurs utilisés en portes optiques, des coupleurs directionnels et des guides passifs. La figure 3 donne un schéma de principe de la réalisation d'un étage de commutation spatiale à base de coupleurs directionnels.

Trois technologies principales se partagent le domaine de la commutation optique guidée :

- la technologie à base de coupleurs directionnels en Niobate de Lithium (LiNbO_3). C'est la technologie la plus mûre, mais qui souffre d'un certain nombre d'inconvénients (prix, encombrement, tension de commande). Depuis 1986, différents groupes ont réalisé, avec des coupleurs directionnels sur substrat LiNbO_3 , des matrices strictement non bloquantes de taille 8×8 ; certaines n'acceptent qu'une seule polarisation (tension de commande de l'ordre de 15 V) d'autres fonctionnent indépendamment de la polarisation au prix d'un accroissement d'un facteur trois environ de la tension de commande. Les pertes fibre à fibre sont de l'ordre de 7 à 10 dB ;

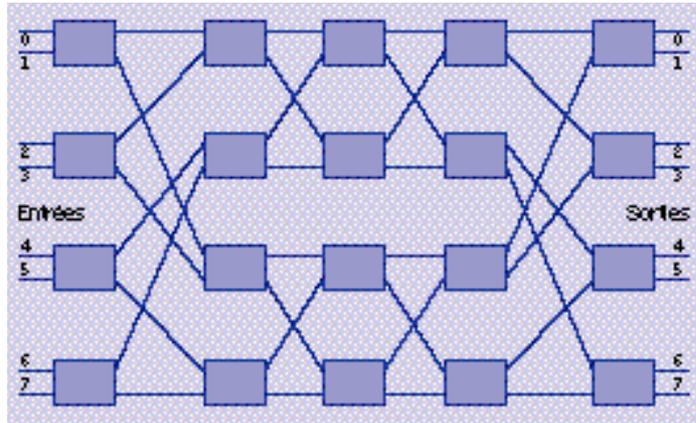


Figure 3 - Etage de commutation spatiale à base de coupleurs directionnels 2×2 : exemple d'un réseau de Benes 8×8 réarrangeable.

- la technologie à base de coupleurs directionnels InP. Pour l'instant la taille des matrices est limitée à 4×4 . Cette technologie présente un certain nombre d'avantages par rapport à la technologie sur LiNbO_3 : elle est compatible avec les composants "classiques" optoélectroniques (lasers, détecteurs,...) d'où une possibilité d'intégration de ces composants avec les points de connexion. D'autre part, puisque des amplificateurs optiques peuvent être intégrés sur le substrat, des matrices sans pertes d'insertion peuvent être fabriquées, qui simplifieront considérablement les problèmes de mises en cascade de matrices ;

- la technologie planaire (silice sur silicium) : c'est une technologie qui a connu un développement rapide dans un passé récent (les laboratoires de NTT sont très avancés dans ce domaine). Elle permet de travailler sur des substrats de silicium de grandes dimensions et de réaliser des guides de lumière de très bonne qualité ainsi que diverses fonctions commandables, comme les filtres et coupleurs à base de Mach-Zehnder commandables thermiquement. Avec de telles fonctions, on obtient des matrices à temps de commutation assez lents.

Cependant un intérêt majeur de cette technologie est d'obtenir des composants passifs relativement complexes (coupleurs 1 vers N, multiplexeurs et démultiplexeurs de longueurs d'onde) avec des coûts potentiellement bas mais aussi des supports pour l'hybridation de composants actifs rapides pour réaliser des matrices de commutation.

Comme les guides optiques sont relativement encombrants à cause de la difficulté de réaliser des rayons de courbure faibles, les matrices obtenues sont plus encombrantes que les matrices de commutation électroniques.

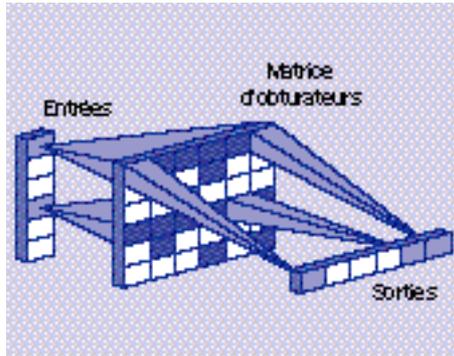
Il semble qu'une taille de matrice de 16×16 sur un seul substrat soit une limite supérieure. La réalisation de réseaux de connexion de dimension plus grande passe par l'association de plusieurs substrats. La dimension maximale pouvant être atteinte dépend, entre autres, des propriétés de blocage du réseau de connexion. L'insertion d'amplificateurs optiques doit permettre d'atteindre des valeurs supérieures à un millier d'entrées.

Il s'agit là, bien sûr, de limites théoriques qui ne peuvent être atteintes que par association d'un grand nombre de composants discrets à bas niveau d'intégration. L'analyse d'un réseau de connexion 128×128 présenté en 1992 par NEC fait ressortir la difficulté de cette démarche (ainsi que l'effort fait pour parvenir à une réalisation). On dénombre en effet pour ce système (dont une partie significative a été effectivement construite) : 8 064 coupleurs directionnels, 784 amplificateurs optiques, 4 288 connexions monomodes.

La connexion des fibres aux entrées, aux sorties ou entre étages constitue un point particulièrement difficile qui suppose des progrès importants dans les techniques d'assemblage pour obtenir des couplages auto-alignés entre des barrettes de fibres optiques et les guides optiques d'interface des matrices.

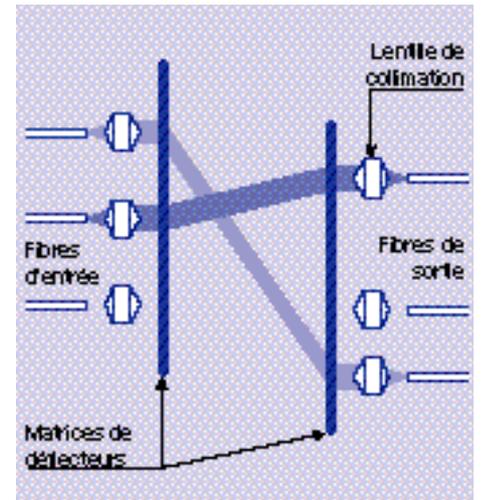
Réseaux de connexion avec propagation libre

La technologie construite autour de la propagation libre dans l'espace représente une rupture par rapport à l'optoélectronique. Elle est dans la droite ligne de l'optique géométrique et s'appuie complètement sur le parallélisme de l'optique. Son intérêt fondamental est de traiter en un même endroit tout un ensemble de signaux optiques sous forme d'un vecteur ou d'une matrice. Alors que, en optique guidée, la brique de base est une matrice 2×2 (le coupleur directionnel), la propagation libre offre des matrices élémentaires de dimension $N \times N$, où N peut varier, suivant les méthodes utilisées, d'une dizaine à une centaine ou plus. Ceci entraîne une réduction des pertes en limitant le nombre de points de connexion traversés par le faisceau aiguillé.



▲ Figure 4 - Architecture "Produit vecteur * matrice".

Figure 5 - Etage de commutation spatiale à base de déflexions. ►



C'est probablement la seule technique qui permettra de construire des matrices optiques de grande dimension. Les systèmes étudiés actuellement sont constitués d'éléments réalisant des connexions 1 vers N soit par illumination de N portes optiques par chacun des faisceaux incidents (architecture dite "produit vecteur * matrice" ; figure 4), soit par déflexion vers N directions (figure 5).

En plus des composants passifs réalisés en barrettes ou en matrices (fibres, lentilles, hologrammes de diffraction...), cette technologie s'appuie sur deux fonctions principales :

- les modulateurs spatiaux de lumière qui sont des matrices d'obturateurs que l'on peut ouvrir ou fermer à l'aide d'une commande électrique ou optique ;
- les réseaux de déflexion à pas variable, inscrits par interférence de deux faisceaux de lumière et jouant le rôle de micromiroirs permettant de défléchir un signal optique dans une direction donnée qui dépend du pas. Ces micromiroirs, organisés en barrettes ou en matrices, permettent d'établir des chemins reconfigurables entre des entrées et des sorties dont les positions dans l'espace sont fixées.

Si on exclut les dispositifs à déplacement mécanique, les matériaux permettant de réaliser ces fonctions d'obturation ou de déflexion sont principalement les cristaux liquides, nématiques ou ferroélectriques, et les matériaux holographiques, avec en particulier les matériaux semiconducteurs photoréfractifs.

Dans le domaine des réseaux de connexion en propagation libre, deux points difficiles nécessitent des recherches approfondies pour que des systèmes opérationnels puissent voir le jour :

- la commande, optique ou électrique, de grandes matrices de connexion, c'est-à-dire la fermeture et l'ouverture des obturateurs ou l'inscription des réseaux de déflexion ;
- la vitesse de reconfiguration d'un point élémentaire. Avec les matériaux existants, cette vitesse est plutôt lente, de l'ordre de la milliseconde. Les cristaux liquides ferroélectriques permettent de descendre à moins de 100 microsecondes.

Une voie nouvelle s'est ouverte récemment : l'utilisation des propriétés électro-optiques des puits quantiques, à base d'InP ou de CdTe, permettra de réduire considérablement les temps de reconfiguration, à des valeurs bien inférieures à la microseconde. Enfin, dans ce domaine, l'exploitation de l'effet photoréfractif a donné naissance à une fonction potentiellement très intéressante pour le couplage entre les fibres et les matrices : le double miroir à conjugaison de phase (DPCM) (voir encadré).

Commutation optique fréquentielle

Appelée également commutation en longueur d'onde, cette technique est le prolongement d'études menées depuis une dizaine d'années sur le multiplexage optique, soit pour exploiter au mieux la capacité de transmission de la fibre optique, soit pour la réalisation de réseaux multicolores. On distingue habituellement deux classes de multiplexage suivant l'espacement ($\delta\lambda$) entre canaux successifs, faible densité pour $\delta\lambda = 1$ nm et haute densité pour $\delta\lambda = 0,1$ nm. La bande utile pour l'ensemble des canaux est celle de l'amplificateur à fibre dopée. Elle conduit à des capacités de 30 à 300 circuits selon la densité de multiplexage.

Le développement de la commutation optique fréquentielle s'appuie sur un petit nombre de composants clés, comme les coupleurs étoilés et les émetteurs et filtres accordables en longueur d'onde. Il convient d'insister sur un composant extrêmement important : le transpositeur

de longueur d'onde dont la fonction est de changer la longueur d'onde de la porteuse du signal optique. Il joue en particulier un rôle fondamental d'interface entre les différents étages d'un système de commutation fréquentielle multiétage. Les résultats les plus prometteurs sont obtenus en utilisant des amplificateurs ou des lasers semiconducteurs.

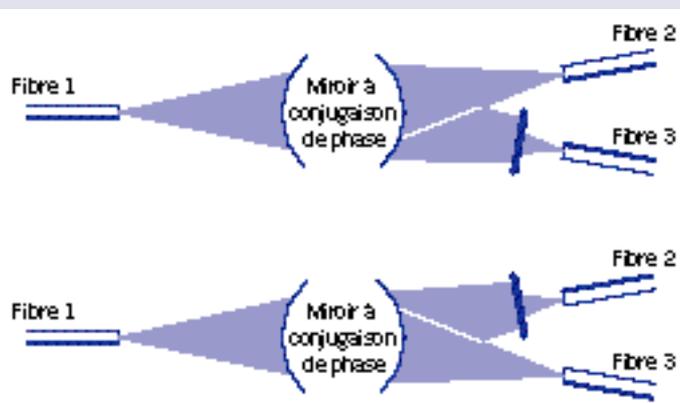
Dans ce domaine, on notera que si des solutions techniques mûres existent pour le multiplexage à faible densité, les solutions pour la haute densité dépendent pour l'essentiel des progrès des composants optoélectroniques InP.

Remarquons enfin que l'utilisation de la commutation fréquentielle ne se limitera pas aux réseaux multicolores. Il est évident que, lorsque différentes longueurs d'onde sont utilisées dans un réseau, la commutation fréquentielle s'introduit naturellement. Cependant, même dans un réseau monocolore, cette technique peut être utilisée en interne à une machine de commutation pour réaliser l'aiguillage des

Les cristaux photoréfractifs et le double miroir à conjugaison de phase

L'effet photoréfractif est un effet optique non linéaire dont l'originalité est de faire interagir des faisceaux de basse intensité (quelques mW). Il provient de la redistribution, sous l'effet d'un éclairage inhomogène, de charges électriques localisées dans un niveau profond partiellement occupé d'un cristal électro-optique isolant ou semi-isolant. Parmi les interactions non linéaires dans les matériaux photoréfractifs, figure la conjugaison de phase par mélange à quatre ondes. Un miroir à conjugaison de phase "réfléchit" un faisceau incident en un faisceau spatialement identique se propageant en sens inverse (faisceau conjugué).

Dans un double miroir à conjugaison de phase, deux faisceaux incidents produisent chacun le complexe conjugué de l'autre. Cette propriété lui permet d'assurer des interconnexions auto-alignées entre deux sources de lumières mutuellement incohérentes de longueur d'onde voisine. Un tel dispositif a été réalisé à des longueurs d'onde intéressant le domaine des télécommunications optiques pour la première fois au CNET Lannion B en 1993, grâce à l'emploi d'une configuration particulière à deux cristaux qui permet d'obtenir une qualité des faisceaux conjugués suffisante pour un couplage efficace dans une fibre monomode. Dans cette expérience préliminaire, réalisée à 1,32 microns avec des cristaux d'InP:Fe, un double miroir à conjugaison de phase se forme en quelques secondes, avec un rendement global dépassant 10 %.



Principe d'interconnexion reconfigurable auto-alignée utilisant les propriétés de la conjugaison de phase. La liaison s'établit entre la fibre 1 et l'une ou l'autre des fibres 2 et 3 suivant la position d'un obturateur.

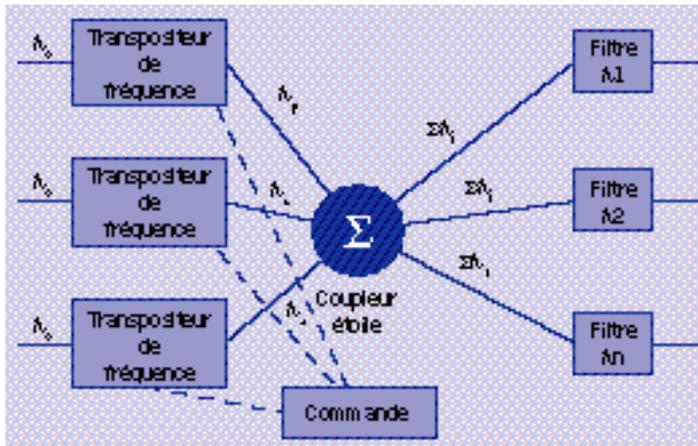


Figure 6 - Principe de commutation fréquentielle avec coloration variable en entrée et filtres fixes en sortie.

signaux, circuits ou paquets. Un exemple est donné sur la figure 6, où les signaux d'entrée sont colorés par des transpositeurs de fréquence en fonction de leur destination de sortie, l'aiguillage se faisant alors automatiquement par filtrage.

Commutation optique temporelle

La possibilité de manipuler à des fins de commutation des signaux optiques multiplexés temporellement est étudiée dans quelques laboratoires depuis une dizaine d'années. Les objectifs affichés en terme de dispositifs se sont souvent focalisés sur la réalisation de matrices de commutation "ATM optique". Dans ce bref état de l'art des possibilités de traitement optique d'un signal temporel, nous aborderons les briques de base : l'aiguillage optique rapide, la logique optique et les mémoires optiques.

Aiguillage optique rapide

En comparaison des nombreuses solutions a priori envisageables pour l'aiguillage optique "lent", on dispose aujourd'hui de relativement peu de techniques permettant d'aiguiller un flux de photons en intervenant au niveau du bit, ou simplement d'un paquet ou d'une cellule ATM... Les matrices de commutation en optique intégrée, à condition que leur taille soit modeste, ont

des vitesses de reconfiguration inférieures à la nanoseconde. Ces performances ont été mises à profit pour réaliser des fonctions de démultiplexage optique à des débits nettement supérieurs à 1 Gbit/s. Les lasers accordables et les filtres accordables à base de lasers ont eux aussi atteints des temps de commutation du même ordre.

Logique optique

Il ne s'agit pas ici de passer en revue les multiples solutions qui ont été proposées pour réaliser des fonctions logiques en optique mais simplement de mentionner quelques exemples. Nous ne parlerons pas en particulier de toute une famille très intéressante de dispositifs utilisant les effets non linéaires dans les fibres optiques.

La commutation optique temporelle nécessite l'association d'un grand nombre de portes logiques élémentaires. Des composants, apparus ces dernières années, peuvent satisfaire cette contrainte. Ils ont tous en commun une disposition matricielle et un fonctionnement transversal (en réflexion ou en transmission). Leur autre point commun est l'utilisation de non-linéarités optiques effectives dans des semiconducteurs III-V. Suivant les cas cette non-linéarité est purement optique (Fabry-Perot non linéaires), ou associée à une photodétection (SEED : Self Electro-optic Effect Devices), ou d'origine purement électronique (VSTEP).

Bien qu'aucun obstacle de principe ne s'oppose au fonctionnement de ces différents types de composants au voisinage de 1,5 μm , les réalisations aujourd'hui les plus avancées font appel aux matériaux GaAs/GaAlAs. Certaines d'entre elles ont permis de réaliser des dispositifs de commutation optique. La réalisation la plus avancée est celle d'AT & T Bell Labs : 16 entrées à 50 Mbit/s et plusieurs étages de matrices de SEED associés à des transistors à effet de champ. La valeur relativement modeste de ce débit est due, non aux performances ultimes d'un élément du type SEED (une commutation en 33 ps a été rapportée par ailleurs), mais aux contraintes qui résultent de leur utilisation dans un système complexe où les problèmes de distribution de la puissance optique, de dissipation thermique, etc., limitent la puissance disponible par élément et par le même la fréquence de fonctionnement.

D'autre part, des éléments du type VSTEP ont permis, en 1991, de réaliser une matrice de connexion 4*4 auto-adressée pour paquets de 256 bits (précédés d'un en-tête de 8 bits), au débit de 1,6 Gbit/s par canal.

Mémoires optiques

C'est dans le domaine, crucial pour un éventuel traitement temporel tout optique de l'information, des mémoires de masse à accès rapide que le fossé est le plus grand entre les performances de l'électronique et celles de l'optique.

Des composants discrets comme les lignes à retard à fibre et les lasers semiconducteurs bistables ont servi, il y a une dizaine d'années, aux premières démonstrations de commutation temporelle optique synchrone. Plus récemment, différents projets de réseau de connexion "ATM optique" ont vu le jour, qui associent un aiguillage basé sur le multiplexage en longueur d'onde et des mémoires à fibre.

Les caractéristiques inhérentes à ce type de mémoire (absence de flexibilité, encombrement,...) font planer un fort doute sur l'intérêt d'une telle approche vis-à-vis des solutions électroniques, tout au moins pour des systèmes de grande taille.

Les principales options technologiques en matière de mémoires optiques numériques matricielles à accès et à reconfiguration rapides sont les mêmes que celles recensées pour la logique optique. Ainsi, les fonctions de mémoire dans la matrice 4*4 à base de VSTEP que nous avons évoquées précédemment sont assurées par des composants du même type. En ce qui concerne les performances envisageables à long terme, une filière telle que les Fabry-Perot non linéaires pourrait conduire à des capacités de l'ordre du Mégabit et des fréquences de quelques dizaines de MHz. Qu'en sera-t-il au même moment des mémoires électroniques ?

Quelles solutions ?

Après cet aperçu des diverses technologies en cours d'étude, il convient de s'interroger sur l'adéquation entre les besoins recensés au début de cet article et les solutions optiques possibles. Plus précisément, il nous faut distinguer les deux grands domaines de la commutation lente et de la commutation rapide :

Commutation lente

Des solutions existent, aussi bien en spatial qu'en fréquentiel, qui permettront de profiter des propriétés de l'optique et, tout particulièrement, de la transparence optique. Les études portent essentiellement sur l'organisation et l'architecture des machines de commutation. Notons, dans ce domaine, un avantage certain de la propagation en espace libre s'il s'agit de réaliser des matrices de commutation de grande taille.

Commutation rapide

C'est un domaine beaucoup plus difficile où, malgré les progrès récents, il n'existe pas encore de solution opérationnelle. Comme on l'a vu précédemment, on ne peut envisager à court terme que de petites matrices, en commutation spatiale guidée et en commutation fréquentielle. D'autre part, l'absence de mémoires autres que les mémoires à fibres constitue un handicap certain pour la commutation optique temporelle. Ces deux faits, la petite taille des matrices et l'absence de mémoires, poussent à favoriser, en matière de recherche sur les nouveaux réseaux optiques, les études de réseaux distribués avec peu ou pas de mémoire tampon.

Les études à France Télécom

Etant donné le poids considérable de la technologie dans le domaine de la commutation optique, il est évident qu'un certain nombre de recherches qui ne sont pas a priori directement motivées par la commutation optique auront un impact sur elle : on peut citer l'ensemble des études de composants optoélectroniques menées au Laboratoire de Bagnex du CNET ainsi que les études de composants intégrés en silice sur silicium et d'hybridation sur circuits optiques menées à Lannion.

De même, les études de réseaux et systèmes optiques (par exemple le routage fréquentiel en transmission, les réseaux multicolores reconfigurables, les boucles optiques avec insertion-extraction,...), menées à Lannion, devraient également avoir une influence sur la définition et la réalisation de nœuds de commutation optique.

Pour ce qui est des études plus directement orientées vers la commutation optique, on peut recenser au CNET :

- les études de systèmes de commutation optique, menées à Lannion. Il s'agit d'études d'architecture de machines de commutation optique (répartiteurs, multiplexeur

d'insertion-extraction, commutateurs de paquets,...). Une technique particulièrement étudiée est la propagation libre par déflexion de faisceaux sur des réseaux inscrits dans des matériaux photothermoplastiques ou des matériaux photoréfractifs ou par utilisation de doubles miroirs à conjugaison de phase (DPCM). L'optique guidée, spatiale ou fréquentielle, avec coloration des paquets entrant et sélection en fonction de leur longueur d'onde, est aussi l'objet de recherches ;

- les études de fonctions optiques, comme la transposition de fréquence, menées au centre Lannion B du CNET ;
- les études de matrices de microrésonateurs optiques, menées au Laboratoire de Bagnex du CNET. Le but est d'obtenir des matrices de bistables optiques pouvant fonctionner soit en points mémoires soit en fonctions logiques élémentaires (ET, OU,...) ;

- les études, effectuées au Laboratoire de Bagnex du CNET, de matrices d'amplificateurs ou de modulateurs optiques utilisés en portes optiques (matrices 2*2 puis 4*4) ;

- une étude de composant pour réseau de diffraction rapide, menée à Lannion. L'objectif est de réaliser, avec des puits quantiques, un composant photoréfractif beaucoup plus rapide que les matériaux massifs comme l'InP dopé fer.

Dans les écoles de la Direction de l'Enseignement Supérieur Technique, la commutation optique est également l'objet d'un certain nombre d'études :

- modélisation et caractérisation de lasers bistables pour réaliser des commutateurs spatiaux ou fréquentiels à Télécom Paris ;
- étude et réalisation, à Télécom Bretagne, d'un aiguilleur optique à adressage intégré, de type produit vecteur matrice, à base de cristaux ferroélectriques et d'un VLSI silicium étudié en collaboration avec le centre Grenoble du CNET. De manière plus générale, Télécom Bretagne conduit un programme de recherche sur l'utilisation des cristaux ferroélectriques comme modulateurs spatiaux de lumière.

Un certain nombre de collaborations existent enfin entre le CNET et la communauté scientifique française, portant soit sur des aspects "matériaux et composants" soit sur des aspects "systèmes"

Conclusion

Le domaine de la commutation optique reste un domaine à forte composante exploratoire, pour au moins deux raisons :

- le programme d'installation des systèmes SDH dans le réseau interurbain, à tous les niveaux et avec des matériels très évolués comme les répartiteurs ou les multiplexeurs d'insertion-extraction, s'étend sur plus de dix années. On obtiendra ainsi une infrastructure neuve de réseau, dotée de fonctionnalités avancées. Par ailleurs, l'ATM commence à faire son apparition dans le réseau et va occuper de plus en plus de créneaux, tant dans les réseaux locaux que dans le réseau général. Ces deux éléments rendent difficile la définition précise des besoins en commutation optique. Il n'y a pas de "trou évident" que la commutation optique puisse combler rapidement ;
- les technologies optiques, malgré des progrès impressionnants, n'ont pas encore atteint un degré de maturité suffisant pour pouvoir être facilement utilisées pour construire des nœuds de commutation optique. C'est pourquoi, plusieurs voies doivent continuer à être explorées, en optique guidée, en propagation dans l'espace libre et en commutation fréquentielle. Surtout, on peut considérer que l'absence de mémoire et de logique optiques constituent, pour l'instant, un handicap pour la commutation optique.

Cependant, grâce au travail de très nombreux laboratoires dans le monde, aussi bien chez les opérateurs que chez les constructeurs et dans le monde académique, des avancées incontestables ont eu lieu. Par exemple, les laboratoires d'AT & T ont consacré des efforts

considérables à la commutation optique numérique à base de SEEDs et ont réussi à montrer qu'un certain nombre de doutes au sujet de la commutation optique n'étaient pas fondés : les problèmes d'encombrement, de réglages des montages optiques, de consommation peuvent être résolus. Les techniques multicolores commencent également à offrir des perspectives encourageantes.

Enfin on trouve de plus en plus d'études sur les réseaux optiques à hauts débits ("Gigabit Networks") qui prennent en compte l'état d'avancement actuel de la commutation optique pour envisager des réseaux optiques de performances supérieures aux réseaux avec commutation électronique (exemple des réseaux de type Manhattan Street Network).

Enfin, le couplage fort entre commutation optique et réseaux à large bande est une motivation puissante pour le développement de systèmes de commutation optique. Si les hypothèses hautes d'évolution de trafic et d'apparition de nouveaux services à hauts débits se réalisent, il faut que France Télécom développe une expertise suffisante pour pouvoir rester un acteur majeur dans le domaine des réseaux et des services.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier ici les personnes qui leur ont apporté leur aide dans la réalisation de cet article, en particulier A. Leclert pour sa relecture critique.

Bibliographie sommaire

- "Photonics in Switching", éd. J.E. Midwinter, Academic Press (1993).
- "Architectures for guided-wave optical space switching system", R.A. Spanke, IEEE Communications Magazine, 25, 42 (1987).
- "1*16 photonic switch operating at 1.55 mm wavelength based on optical amplifiers and a passive splitter", U. Koren, M.G. Young, B.I. Miller, M.A. Newkirk, M. Chien, C. Dragone, B. Glance, T.L. Koch, B. Tell, K. Brown-Goebeler and G. Raybon, Appl. Phys. Lett., 61, 1613 (1992).
- "Interconnexions holographiques reconfigurables", P. Gravey, L'Echo des Recherches, n° 154, 3, (1993).
- "Self-aligned holographic interconnects between single mode fibres with mutually pumped phase-conjugate mirrors", N. Wolffer, V. Vieux, V. Royer, G. Picoli and P. Gravey, Int. Jour. of Opt. Comp., 2, 245 (1991).
- "Holographic optical switching using a ferroelectric liquid crystal spatial light modulator", H. Yamazaki and M. Yamaguchi, Photonic Switching'92, 3D4.
- "Construction of a matrix-matrix crossbar optical interconnect employing diffractive fan-out and fan-in elements", A.C. Walker, M.R. Taghizadeh, B. Robertson, D.J. McKnight, I.R. Redmond, C.P. Barret, P. Blair, H.J. White, N.A. Brownjohn, C. Stace, G.M. Proudley, M.J. Birch, W.A. Crossland, 4th Int. Conf. on Holographic Systems, Components and Applications, p.31, (1993).
- "Evolution of the SEED technology : bistable logic gates to optoelectronic smart pixels", A.L. Lentine and D.A.B. Miller, IEEE Journ. of Q. Elec., 29, 655 (1993).

■ “Photonic switching nodes based on self electro-optic devices”, A.L. Lentine, T.J. Cloonan, F.B. Mc Cormick, *Opt. and Q. Elec.*, 24, S443 (1992).

■ “Prospects for further threshold reduction in bistable microresonators”, J.L. Oudard, R. Kuszelewicz, B. Sfez, J.C. Michel, *Opt. and Q. Elec.*, 24, S193 (1992).

■ “Dense wavelength division multiplexing networks: principle and application”, C.A. Brackett, *IEEE J. Select. Areas Comm.*, 8, 948 (1990).

■ “Rack-mounted 2.5 Gbit/s ATM photonic switch demonstrator”, D. Chiaroni, P. Chavignet-Morin, P.A. Perrier, S. Ruggeri, S. Gauchard, D. de Brouerd, J.C. Jacqinot, C. Chauzat, J. Jacquet, P. Doussière, M. Monnot, E. Grard, D. Leclerc, M. Sotom, J.-M. Gabriagues, J. Benoît, *ECOC 93, ThP 12* (1993).