



HAL
open science

Des interconnexions holographiques à l'aiguillage dynamique pour les réseaux de communications optiques

Bruno Fracasso

► **To cite this version:**

Bruno Fracasso. Des interconnexions holographiques à l'aiguillage dynamique pour les réseaux de communications optiques. Optique / photonique. Université de Bretagne Sud, 2010. tel-00691577

HAL Id: tel-00691577

<https://theses.hal.science/tel-00691577>

Submitted on 2 May 2012

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Mémoire

présenté devant

l'Université de Bretagne Sud

par

Bruno Fracasso

pour l'obtention de

l'Habilitation à Diriger des Recherches

**Des interconnexions holographiques à
l'aiguillage dynamique pour les réseaux
de communications optiques**

Soutenance prévue le **Lundi 13 septembre 2010**, devant le jury composé de :

Pierre AMBS

Yann LE GRAND

Pierre PELLAT-FINET

Jean-Louis DE BOUGRENET DE LA TOCNAYE

Philippe GRAVEY

André PERENNOU

Rapporteur

Rapporteur

Rapporteur

Examineur

Examineur

Examineur

Table des matières

Liste des abréviations	1
I Quelques développements thématiques	7
1 Thèmes de recherche	9
2 Calcul et interconnexions optiques tridimensionnels	15
2.1 Degrés de liberté spatiaux d'un front d'onde	16
2.2 Système d'interconnexions tridimensionnelles	18
2.2.1 Modèle général	18
2.2.2 Codage optique du tenseur d'interconnexions	20
2.3 Transformations géométriques holographiques	21
2.3.1 Contexte	21
2.3.2 Approche itérative	23
2.3.3 Généralisation : transformations non-analytiques	24
2.4 Réseau de calcul à plan de nœuds	27
2.4.1 Principe	27
2.4.2 Implantation optique du RIPN et résultats expérimentaux	30
2.5 Conclusions et perspectives	34
3 Interconnexions et aiguillage optique entre fibres monomodes	37
3.1 Contexte et état de l'art	38
3.1.1 Réseaux WDM et transparence optique	38
3.2 Principe de l'aiguilleur optique	41
3.2.1 Cahier des charges	41
3.2.2 Interconnexions $1 \times N$ de fibre à fibre	42
3.3 Déflexion de faisceau rapide à cristal liquide ferroélectrique	45
3.3.1 Déflexion de faisceau digitale	45
3.3.2 Déflexion 2D et niveau d'intégration	49
3.3.3 Cristaux liquides et cellule SSFLC	50
3.3.4 Modulation spatiale et réseau de biréfringence diffractant	51
3.3.5 Adressage, bistabilité et transparence optique	53
3.4 Démonstrateurs d'aiguillage optique 1D : résultats	56
3.4.1 Phase 1 : modulateur FLC 1×256 pixels	56
3.4.2 Phase 3 : aiguilleur optique 1×14 fibres	57

3.5	Conclusions	61
4	Aiguillage optique de forte capacité pour les réseaux optiques	63
4.1	Modulateur FLCOS pour la déflexion de faisceau à 1,55 μm	63
4.2	Deflexion holographique 2D à modulation de phase binaire	66
4.3	Matrice de fibres optiques optimisée pour la déflexion holographique	69
4.4	Intégration et test d'un aiguilleur optique spatio-fréquentiel	73
4.5	Conclusions et perspectives	73
5	Modélisation et simulation de nœuds de routage de canaux optiques	75
5.1	Modélisation et simulation d'anneaux optiques métropolitains	76
5.2	Modélisation et simulation de nœuds de brassage optique	80
5.3	Conclusion et perspectives	81
6	Nouveaux axes de recherche	85
7	Conclusion générale	87
II	<i>Parcours personnel</i>	95
III	<i>Sélection de publications</i>	111

Liste des abréviations

CGH	Computer-generated hologram.
CLP	Cartésienne-Log polaire [Transformée _].
CNET	Centre national d'études des télécommunications.
CRISTO	Cristaux liquides pour fonctions de routage insérés dans le réseau de transport optique [<i>Projet</i> _].
DFB	Distributed feedback laser.
DWDM	Dense wavelength division multiplexing.
FLC	Ferroelectric liquid crystal.
FOTON	Fonctions optiques pour les télécommunications.
FTTH	Fiber to the home.
GOSC	Groupe optique et systèmes de communications.
GS	Gerchberg-Saxton [Algorithme de _].
HDR	Hologramme digital reconfigurable.
HFM	Hologramme à facettes multiples.
HSO	Hologramme synthétisé par ordinateur.
IFTA	Iterative Fourier transform algorithm
IT	Invariant(e) par translation [Système linéaire _, système d'interconnexions _]
ITO	Indium tin oxide
LCD	Liquid crystal display.
LCOS	Liquid crystal on silicon.
LOS	Line of sight.
MEMS	Micro electro-mechanical systems.
MOEMS	Micro opto-electro-mechanical systems.
MSL	Modulateur spatial de lumière.
MSLAO	Modulateur spatial de lumière adressé optiquement.
MSLAE	Modulateur spatial de lumière adressé électriquement.
NIT	Non-invariant(e) par translation [Système linéaire _, système d'interconnexions _]
NRZ	Non return to zero [Modulation d'amplitude codée en _]
OASLM	Optically addressed spatial light modulator.
OSF	Optique sans-fil.

OXC	Optical cross-connect (Brasseur optique)
PDL	Polarisation dependant loss.
PERDYN	Plate-forme d'études et de recherche sur les fonctions dynamiques en optoélectronique.
PERSYST	Plate-forme d'études et de recherche sur les systèmes de télécommunications.
PMD	Polarisation mode dispersion.
POF	Polymer optical fiber.
ppp	Pixels par période [Nombre de _].
RC	Réseau de calcul.
RLD	Réseau local domestique.
RI	Réseau d'interconnexions.
RIPN	Réseau d'interconnexion à plan de nœuds.
RNRT	Réseau national de recherche en télécommunications.
RYTHME	Réseaux hybrides transparents hiérarchiques multiplexés en longueur d'onde [Projet _].
SDH	Synchronous digital hierarchy.
SLM	Spatial light modulator.
STM	Synchronous transfer module.
SSFLC	Surface-stabilised ferroelectric liquid crystal
TC	Transformation de coordonnées.
TEB	Taux d'erreur binaire
TF	Transformée de Fourier.
TG	Transformation géométrique
TOI	Traitement optique de l'information
VCSEL	Vertical cavity surface emitting laser.
VLSI	Very large scale integrated circuit.
WDM	Wavelength division multiplexing.

Introduction générale

Les travaux présentés dans ce mémoire s'étalent sur une période d'une vingtaine d'années, partagées entre la recherche et l'enseignement. Mes recherches, la plupart du temps supportées ou mises en valeur par des études contractuelles, ont constamment évolué au niveau thématique, par un choix délibéré de ne pas m'enfermer dans une problématique trop ciblée. Si l'objet central des études est la connectique optique spatiale à forte bande-passante spatiale et temporelle, le niveau d'approche a transité progressivement du concept à la modélisation, en passant par le composant, le dispositif et le système. Le champ d'applications, peu délimité au départ, s'est progressivement rapproché du domaine des télécommunications optiques. L'approche expérimentale a toujours été menée le plus loin possible, par souci de validation des hypothèses avancées. Cette démarche ayant souvent un coût financier important, j'ai eu la chance de participer à des projets permettant de supporter généreusement ces ambitions.

Compte-tenu du renouvellement thématique évoqué ci-dessus, la liste des chapitres de ce document suit une progression qui n'est pas loin d'être chronologique. Le discours adopté est parfois plus descriptif que synthétique, mais ce choix est délibéré, dicté par la volonté de bien exposer des modèles et des procédures assez souvent originales, élaborés de manière indépendante.

Le document est divisé en trois parties.

La première –regroupant les chapitres 1 à 6– décrit les travaux menés suivant les différents thèmes de recherche. Le premier chapitre résume de manière linéaire les étapes de mon parcours scientifique. On y trouvera principalement l'enchaînement de mes activités contractuelles et de mes encadrements de thèse. Les chapitres 2 à 5 présentent une série de thématiques de recherche, en décrivant l'état de l'art et la problématique soulevée. La démarche adoptée est illustrée par les résultats obtenus. Des perspectives sont également proposées en conclusion. Le chapitre 6 présente les perspectives générales et les nouvelles thématiques actuellement explorées.

La deuxième partie résume mon parcours personnel et fournit une synthèse des activités annexes à la recherche.

La troisième partie regroupe une sélection de publications représentatives des thèmes scientifiques abordés.

Première partie

Quelques développements thématiques

Chapitre 1. *Thèmes de recherche*

a) Contexte et synthèse

Les travaux de recherche présentés dans ce mémoire ont été menés au sein du département d'Optique de l'Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications de Bretagne¹, membre de l'UMR 6082² du CNRS. J'ai été accueilli au sein de l'entité en 1990, lors du démarrage de ma thèse de doctorat effectuée sous l'encadrement de Prof. Jean-Louis de Bougrenet de la Tocnaye, chef du département, et sous la direction de Prof. Pierre Ambs, de l'Université de Haute-Alsace. Ayant obtenu un poste de maître de conférences à Telecom Bretagne en 1994, j'y ai poursuivi mes activités de recherche tout en développant des activités d'enseignement, couvrant un spectre assez large s'étendant de la théorie du signal aux composants et dispositifs optiques pour les réseaux photoniques. L'interaction entre enseignement et recherche a été constante, cette dernière me permettant d'amender de manière substantielle le contenu des cours, travaux dirigés, travaux pratiques et autres projets proposés aux étudiants. Maintenir ce lien a permis d'impliquer de nombreux élèves ingénieurs sur des sujets ayant trait à la recherche. Nous donnons plus d'informations sur le versant pédagogique dans le curriculum vitae détaillé fourni en Partie II.

Mes activités de recherche ont alterné des études sous contrat et des études hors-contrat autour d'une thématique centrale, le plus souvent pour répondre à des besoins venant d'opérateurs et équipementiers du monde des télécommunications. Ainsi, la trame générale de ces travaux a-t-elle été d'orchestrer et de mettre en œuvre la synergie entre l'holographie digitale et les modulateurs spatiaux de lumière à cristal liquide, dans le but de réaliser des dispositifs de traitement optique spatial dynamique ou de commutation spatiale pour les réseaux de communications optiques. Voici le contexte général et l'enchaînement des différents développements.

Mes recherches contractuelles ont été financées par des marchés publics, des institutions comme le ministère de l'industrie et de la recherche, des organismes comme le CNRS, l'Institut Telecom, la DRET³ ou l'ONERA⁴, des fonds Européens (FP6 et FP7, réseaux d'excellence e-PHOTON-ONE et BONE), ou des industriels comme SAGEM ou Optogone. Ces contrats ont été réalisés en étroite collaboration avec des partenaires industriels tels qu'Alcatel-Lucent, France-Telecom, Thalès LCD, Opto+, CRL Opto, PHS Mems, Jobin-

¹que nous désignerons par Telecom Bretagne.

²FOTON : Fonctions Optiques pour les Télécommunications.

³Direction des Recherches et Etudes Technique, organisme de recherches militaires de l'armée Française, toutes armes confondues.

⁴Office national d'études et de recherches aérospatiales.

Yvon, Highwave Optical Technologies, et en collaboration avec d'autres institutions académiques telles que Telecom ParisTech, Telecom Lille 1, Cambridge University, Politecnico di Torino et l'Ecole Navale.

Parallèlement, j'ai mené des recherches hors-contrat me permettant d'anticiper certains appels à proposition et d'élargir mon domaine de compétences académiques et méthodologiques. Dès l'issue de ma thèse, j'ai ainsi complété mon travail sur les interconnexions optiques holographiques en y incorporant des méthodes de synthèse itérative de transformation de coordonnées optiques, puis en développant des applications liées au filtrage optique spatial linéaire (corrélation simple), non-linéaire (corrélation conjointe), pour terminer sur une étude sur le couplage entre éléments optiques diffractants fixes et dynamiques sur cristal liquide ferroélectrique (FLC), pour la déflexion de faisceau bidimensionnelle rapide. Cette phase d'investigations nous a permis d'acquérir une expertise dans le domaine de la conception d'hologrammes synthétisés par ordinateur (HSO), puis dans leur fabrication avec la mise en place de moyens technologiques dédiés (salle blanche de classe 100), en collaboration avec mon collègue Kevin Heggarty.

Je me suis alors intéressé aux interconnexions dynamiques entre fibres monomodes, débouchant naturellement sur la conception de dispositifs d'aiguillage et de commutation pour les réseaux optiques WDM⁵, à une époque où la commutation de circuits optiques était vue comme la seule alternative optique au routage et la protection électronique, telle qu'opérée par la couche SDH⁶. Les contraintes principales ont porté sur les temps de commutation requis –inférieurs à la milliseconde– et des capacités de plusieurs dizaines de voies indépendantes. Nous avons ainsi poussé le plus loin possible le concept d'holographie digitale dynamique sur modulateur spatial de lumière (MSL) de type FLC, aboutissant à la conception et l'intégration de plusieurs générateurs d'aiguilleurs de bandes optiques.

Plus tard, suite à discussion avec un industriel désireux de développer des règles d'ingénierie sur les anneaux et les réseaux maillés WDM, je me suis impliqué dans l'évaluation et le développement d'un outil de simulation photonique pour les dispositifs de commutation et de brassage transparent de canaux optiques, nécessitant la modélisation, l'assemblage et le calcul de centaines de composants élémentaires.

Plusieurs directions de recherche ont émergé depuis 2008, centrées sur le dimensionnement et l'intégration de réseaux locaux utilisant l'optique comme canal de propagation sans fil à très haut débit et à faible impact sanitaire et environnemental.

En guise de synthèse, la figure 1.1 donne un aperçu des encadrements doctoraux et projets de recherche associés.

⁵Wavelength Division Multiplexing.

⁶Synchronous Digital Hierarchy.

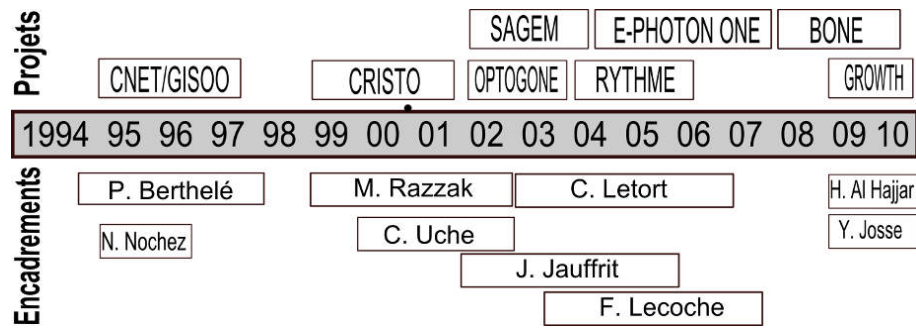


FIG. 1.1 – Frise chronologique des projets et activités d’encadrement doctoral.

b) Interconnexions et calcul optique en espace libre

Au même titre que les communications à fibre optique et les technologies d’affichage, le traitement optique de l’information (TOI) monopolisa les recherches académiques et industrielles sur plusieurs décennies. L’approche spatiale utilisant la propagation optique en espace libre se prêtait naturellement à l’implantation de fonctions de traitement massif et parallèle. Le cas le plus spectaculaire est celui de la transformée de Fourier Optique, obtenue naturellement par diffraction d’une onde monochromatique entre deux sphères échangeant centre et pôle. Avec un pic d’activité atteint dans les années 1980-90, le TOI suivit trois directions essentielles : le calcul optique analogique, le calcul optique digital et le calcul optique neuronal. On parla même d’optique dans l’ordinateur (voire d’ordinateur optique) lorsqu’on tenta de regrouper sous une même thématique le TOI et les deux disciplines que sont la *physique des matériaux optiques non-linéaires* et les *architecture des ordinateurs* [1]. Par la suite, la densité d’intégration des circuits électroniques connut une explosion, pour aboutir au formidable rapport puissance/coût des processeurs actuels, freinant les ardeurs de la communauté du TOI.

Dans ce contexte et au sein du groupe Optique et Systèmes de Communications (GOSC) du département d’Optique de Telecom Bretagne, j’ai débuté mes travaux de recherche en 1990 par une étude proposée par la DRET, portant sur l’implantation optique d’un moteur d’élagage d’arbre décisionnel en intelligence artificielle [2]. Dans ce cas, les données à traiter sont spécifiées sous forme de matrices booléennes entre lesquelles on doit combiner de manière intensive des opérations de multiplication simple ("ET" logique) et de multiplication matricielle. Réalisée de manière parallèle, le temps de calcul de l’opération devient indépendant de la taille des matrices. Nous avons proposé une architecture d’interconnexions optiques en espace libre permettant de modéliser ces opérations de calcul optique parallèle [3]. Le système reposait sur un plan de nœuds intermédiaire permettant d’introduire un tenseur de connexions reconfigurables de dimension 4 entre les deux plans de données matricielles. L’implantation optique du plan de nœuds reposait sur une matrice d’hologrammes digitaux de Fourier pour les interconnexions, couplée à un MSL à cristal liquide optiquement adressé (valve optique) assurant la régénération spatiale de l’information [4]. Outre la multiplication matricielle optique, le modèle à plan de nœuds était suffisamment souple pour implanter d’autres opérations intensives, telles que le calcul des états neuronaux au sein de réseaux de neurone d’ordre 1 et 2. Après avoir modélisé et implanté l’opération de base du moteur

d'inférence, nous avons été confrontés au double problème de manipulation et de stockage de la grande quantité de matrices mises en jeu, ces deux opérations se révélant extrêmement complexes à réaliser optiquement. Telle était d'ailleurs la conclusion d'autres auteurs, préconisant à ce stade une gestion électronique au prix d'une perte du parallélisme. A l'heure actuelle, la question ne se poserait même plus ! Cette étude nous avait cependant suggéré qu'une procédure complexe telle que la multiplication matricielle optique débouchait sur une classe d'opérations plus générale mettant en jeu un réseau d'interconnexions non-invariantes spatialement entre deux plans de données. Les solutions optiques utilisées jusqu'alors étaient basées sur l'utilisation de réseaux holographiques analogiques multiplexés angulairement dans un matériau épais photosensible, peu souples d'utilisation et sujets aux intermodulations entre réseaux.

D'un point de vue méthodologique, ce travail nous a forgé une expertise dans le domaine des techniques de calcul des hologrammes synthétisés par ordinateur (HSO), et les méthodes de fabrication associées. Il a permis également d'initialiser une –longue– série d'étude sur les modulateurs à cristal liquide ferroélectrique. Cette thématique a également mis en évidence l'apport en capacité de traitement résultant du couplage entre HSO et MSL. L'étude fut prolongée par une approche théorique et expérimentale de la conception de HSO pour les interconnexions optiques massives, combinant les géométries spatialement invariantes [5, 6, 7, 8] et non-invariantes [9].

c) Commutation et aiguillage optique holographique

Dès le milieu des années 90, l'introduction massive du multiplexage en longueurs d'onde (WDM) dans les réseaux de transport sur fibre optique a ouvert la voie à une augmentation très forte des capacités des liens de communications des opérateurs. Elle a notamment permis d'absorber la demande phénoménale du trafic internet mondial et le déploiement massif des réseaux téléphoniques cellulaires. Au prix de recherches acharnées sur les composants et les systèmes de transmission optique, les débits transportés par les liens les plus performants se chiffrent désormais en Terabit/s sur des centaines de kilomètres. L'entité de base de la couche optique est le canal optique (la longueur d'onde) sur lequel on réalise maintenant de l'insertion/extraction optique reconfigurable.

De nombreuses études exploratoires ont été générées sur les brasseurs et commutateurs optiquement transparents, pour lesquels les architectures en espace libre fournissent naturellement une forte capacité (plusieurs centaines d'entrées-sorties) et des faibles niveaux de diaphonie spatiale (< -30 dB). Ces thématiques constituent un prolongement naturel de la thématique "Interconnexions", puisque l'opération de commutation optique spatiale est modélisable par un système d'interconnexions dynamiques entre deux plans de fibres optiques mono-modes. Le caractère dynamique (ou reconfigurable) sera assuré par un MSL à cristal liquide, opérant en défecteur par affichage des réseaux de diffraction, et plus généralement d'hologrammes digitaux périodiques de pas variable.

Mes travaux dans ce domaine portent d'abord sur la conception de MSL optiquement transparents au couplage entre fibres ainsi qu'au débit de modulation, et présentant de bons rendements de déflexion mono-dimensionnelle de faisceau [10]. L'utilisation de cellules à cristal liquide ferroélectrique autorise un fonctionnement indépendant de la polarisation lumineuse, et des temps de commutation très faibles, de l'ordre de 300 microsecondes [11]. La thèse

de Patrick BERTHELÉ met en évidence l'apport des techniques de conception de HSO pour un dimensionnement conjoint des fonctions de déflexion et de la géométrie des matrices de fibres mono-modes en entrée-sortie du commutateur spatial optique. La proposition d'une topologie de disposition non-régulière des fibres rejette les niveaux de diaphonie spatiale au-delà de -35 dB sur une série de démonstrateurs expérimentaux, en liaison avec des industriels des composants optiques fibrés [12, 13]. Dans la foulée, la thèse de Mustapha RAZZAK incorpore au dispositif une fonction de sélectivité spectrale de type "bande WDM", en tirant parti de la nature diffractive de l'élément d'aiguillage spatial [14, 15]. Un commutateur FLC à 14 voies, opérant à 1550 nm et optiquement transparent au débit de 10 Gbit/s est présenté pour la première fois [16]. Ces travaux sont jugés positifs par la communauté scientifique, et des collaborations académiques (University of Cambridge) et industrielles (Optogone, CRL Opto) sont sollicitées pour étendre le concept à des dispositifs à déflexion bi-dimensionnelle. Nous participerons ainsi activement au projet CRISTO⁷, labellisé par le RNRT⁸ en 1999, qui a intégré et évalué, en vue de leur introduction dans les brasseurs optiques transparents, des fonctions de commutation spatiale basées sur le routage de signaux optiques en espace libre au moyens de MSL à cristal liquide. Les thèses de Chidi UCHE et de Cédric LETORT permettront ainsi de lever deux verrous technologiques : le fonctionnement optimisé à la longueur d'onde "telecom" de 1,55 μm de MSL bi-dimensionnels à cristal liquide ferroélectrique [17, 18] et la conception, fabrication et test de matrices bidimensionnelles fibres mono-modes à géométrie non-régulière (jusqu'à 64 fibres), présentant des taux de couplage de fibre-à-fibre de l'ordre de 1 dB [19]. Les concepts de déflexion digitale et de HSO pseudo-périodiques sont introduites et utilisées pour tirer partie de la grande souplesse et de la forte résolution spatiale des interconnexions holographiques entre fibres [20]. Entre temps, la technologie des commutateurs sélectifs en longueur d'onde de granularité canal optique (WSS) a envahi le marché sur des concepts relativement proches de nos architectures.

d) Modélisation et simulation de nœuds de routage de canaux optiques.

La nécessité d'évaluer les performances opérationnelles des dispositifs de commutation et de brassage optique sur des liens de transmission d'un réseau optique me dirige vers la simulation logicielle de ces structures. L'objectif est de déterminer l'impact des choix technologiques et architecturaux sur la qualité des signaux numériques véhiculés optiquement, en termes de taux d'erreur binaire (TEB). Les travaux sont réalisés sur une plate-forme de simulation de transmission optique (VPI Transmission Maker). Différents modèles de nœuds optiques de complexité croissante sont étudiés. Ainsi, la thèse de Jérémie JAUFFRIT valide-t-elle une architecture générique de nœud d'insertion-extraction de canaux optiques à faible pertes pour les anneaux WDM métropolitains [21]. Ce travail fut financé par l'équipementier SAGEM. Des modèles de composants optiques mesurés expérimentalement sont introduits dans le simulateur (modèles dits "exacts") et assemblés pour bâtir les nœuds et simuler le réseau. Cette approche originale a été reprise et généralisée au brassage optique dans la thèse de Frédéric LECOCHÉ pour étudier et comparer deux technologies de brasseurs optiques transparents (à micro-miroirs et réseaux de diffraction) [22]. La prise en compte dans les modèles logiciels des paramètres physiques mesurés sur les composants a permis de modéliser des

⁷Cristaux Liquides pour Fonctions de Routage Insérées dans les Systèmes de Transport Optique.

⁸Réseau National de Recherche en Télécommunications.

structures "plausibles" de dispositifs de routage de canaux optiques, dont les performances statiques et dynamiques sont ensuite évaluées pour fournir des points d'entrée aux algorithmes de dimensionnement d'un réseau WDM [23]. Le cadre de cette étude était le projet RYTHME⁹, labellisé par le RNRT en 2004, qui a pour objectif pour de réduire la complexité et le coût des réseaux de transport opaques, basés sur une régénération électronique systématique (SDH), en définissant la notion de réseau Hybride, ou partiellement transparent.

e) Réseaux optiques sans fil à très haut débit

Un nouvel axe de recherche a émergé en 2009. Il s'inscrit dans la thématique de la conception des réseaux domestiques du futur, où l'on doit satisfaire les trois demandes a priori antagonistes que sont le très haut-débit, le "sans-fil" et le respect de l'environnement et des normes sanitaires. Deux thèses de doctorat ont démarré en Octobre 2009 sur deux sujets complémentaires :

- Hani AL HAJJAR : conception et intégration d'un réseau domestique optique sans fil à très haut débit, à impact environnemental et sanitaire réduits. L'étude est financée par l'Institut Telecom,
- Yves JOSSE : Modélisation de la consommation dans les réseaux sans-fil à très haut débit de type Radio-sur-fibre.

Même si le contexte et les ordres de grandeur mis en jeu sont différents, ces études constituent pour moi un retour aux sources, dans la mesure où l'optique en espace libre est la technologie considérée en priorité pour répondre aux problèmes posés.

⁹Réseaux hYbrides Transparents Hiérarchiques Multiplexés En longueur d'onde

Chapitre 2. *Calcul et interconnexions optiques tridimensionnels*

Les communications optiques à fibre monomode pour les interconnexions à moyenne et longue distance ont permis le développement rapide de l'internet et de la téléphonie mobile en moins de deux décennies. Après avoir réussi à s'introduire dans le réseau d'accès pour y amener le haut débit (FTTH¹, 100 Mbit/s), l'optique est encore plus que jamais en compétition avec le cuivre pour les liaisons intra-calculateur à très haut débit. Les avantages des interconnexions optiques sont multiples : faible atténuation et peu de distorsion, faibles puissances émises, émetteurs/récepteurs intégrés et grande immunité aux perturbations électromagnétiques [24]. Des connecteurs parallèles à fibre optique présentant plusieurs dizaine de voies sont disponibles commercialement, opérant à plusieurs dizaines de Gbit/s sur des distances variant de quelques centimètres à plusieurs dizaines de mètres. Il existe toutefois des applications où le nombre de voies spatiales requises est bien plus important, avec des topologies d'interconnexions ne se limitant pas à de simples liaisons point-à-point (calculateurs multi-processeurs, commutateurs optiques spatiaux pour les télécoms). Dans un passé récent, des progrès substantiels ont été réalisés dans le domaine des interconnexions optiques parallèles : hybridation de sources laser à émission par la surface (VCSEL²) sur des circuits intégrés sur silicium, techniques d'assemblage d'interconnexions en espace libre, fabrication de matrices de fibres optiques ou encore intégration de guides d'ondes optiques sur des circuits imprimés. Cette science des interconnexions optiques puise sa source dans le traitement optique spatial de l'information. Développée dès les années cinquante et réalité physique dès l'apparition du laser et de l'holographie, cette discipline a régulièrement progressé suivant les quatre axes distincts que sont : le calcul optique analogique [25], le calcul optique numérique [26], le calcul optique neuronal [27] et les interconnexions optiques [28]. De nombreux auteurs ont mis en avant et tiré parti des points communs entre calcul et interconnexions optiques, dès lors que l'on utilise la propagation en espace libre pour transférer l'information entre deux plans de données.

Ce dernier point consitue l'essentiel des travaux présentés ce chapitre, où nous exploitons le potentiel résultant de l'association de deux composants : l'hologramme synthétisé par ordinateur (HSO) et le modulateur spatial de lumière (MSL) à cristal liquide, adressé

¹Fiber to the Home.

²Vertical Cavity Surface Emitting Lasers.

électriquement ou optiquement. L'exposé de nos activités est précédé d'une synthèse sur les systèmes de connexions optiques tridimensionnels.

2.1 Degrés de liberté spatiaux d'un front d'onde

Depuis les travaux de Duffieux et Maréchal [29, 30], la capacité de l'optique à fournir de manière naturelle une Transformée de Fourier (TF) bidimensionnelle a été fréquemment utilisée en traitement spatial de l'information. Dans la majorité des cas, l'opération visée est le filtrage complexe spatial [31]. Dans un cadre plus général, G. Bonnet a établi que la géométrie permettant d'obtenir une TF spatiale est représentée par un émetteur et un récepteur situés sur des sphères échangeant centre et sommets [32]. Contrairement à l'approximation paraxiale – dite de premier ordre – rendant compte d'un transfert de champ entre deux plans et popularisée par Goodman [33], cette théorie métaxiale repose sur un développement au deuxième ordre du vecteur position hors de l'axe optique du système. La figure 2.1.a sché-

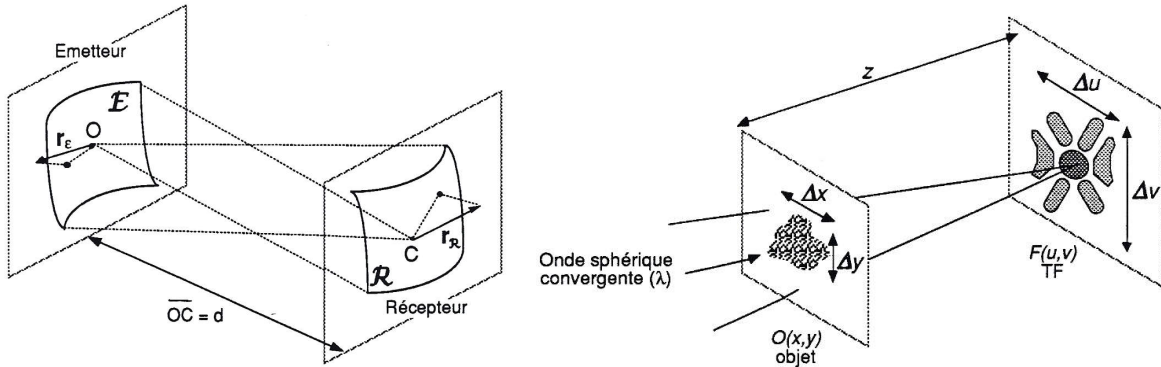


FIG. 2.1 – (a) Transformée de Fourier optique entre deux sphères, dont les points courants sont repérés par les rayons vecteurs \vec{r}_E et \vec{r}_R dans les plans tangents – (b) Obtention d'un émetteur optique sphérique, par illumination d'un objet plan $O(x,y)$ au moyen d'une onde sphérique convergente en un point situé à une distance z de l'objet.

matise le passage d'une sphère émettrice \mathcal{E} à sa sphère réceptrice \mathcal{R} . Le transfert de champ entre deux points de \mathcal{E} et \mathcal{R} est décrit par le gain complexe [32] :

$$h(\vec{r}_E, \vec{r}_R) = \frac{i}{\lambda d} \exp\left(\frac{2i\pi}{\lambda d} \vec{r}_E \cdot \vec{r}_R\right) \quad (2.1)$$

Par intégration sur les éléments de \mathcal{E} , on obtient une relation rigoureuse de TF bidimensionnelle entre les deux sphères conjuguées. Une application directe est le laser à cavité confocale, siège d'une onde invariante par TF. De manière pratique, on obtient un émetteur sphérique par illumination d'un objet plan $O(x,y)$ au moyen d'une onde sphérique monochromatique convergente (fig. 2.1.b). En raison de la difficulté de réaliser un récepteur sphérique, on ne considère la TF que sur un plan tangent au récepteur, localisé au point de convergence de l'onde. L'erreur de phase due à la transparence de courbure est alors minimale si l'on se place proche de l'axe. Les travaux de G. Bonnet ont été diffusés et prolongés dans les années 90 par P. Pellat-Finet, alors enseignant-chercheur à Telecom Bretagne. Son

ouvrage de synthèse sur l'Optique de Fourier fait désormais office de référence sur le sujet [34].

L'information véhiculée par une onde monochromatique a un caractère essentiellement spatial, contenu dans son amplitude complexe $U(\vec{r})$. En vue d'utiliser ce front d'onde pour transmettre une information, on peut s'intéresser à son nombre de degrés de liberté, i.e. le nombre de points indépendants qui le constituent. Ce paramètre a été étudié par D. Gabor –père de l'holographie– qui en a proposé une expression géométrique [35], en montrant que l'information structurelle contenue dans une onde lumineuse restreinte par un système optique à une surface de A (m²) et une ouverture angulaire de Ω (sr) est bornée. Elle correspond au *nombre de degrés de liberté* véhiculés à la longueur d'onde λ , donné par $F = A\Omega/\lambda^2$. Cette quantité a également été désignée par *nombre de Shannon* par ceux qui l'ont étudiée en détail. Si la phase et/ou la polarisation de l'onde électromagnétique peuvent être exploitées, la valeur de F est à multiplier par 2 ou 4. Du point de vue de l'optique géométrique, cette quantité correspond à l'étendue géométrique. Elle est donc invariante par propagation dans tout système optique linéaire et homogène vis-à-vis de l'amplitude complexe du champ. Ce sera le cas de l'espace libre, considéré dans nos modèles comme le milieu de propagation. En tenant compte de l'aspect bruité (donc statistique) du champ, le nombre N_b de bits³ pouvant être véhiculés par chaque degré de liberté spatial dépend du rapport signal-sur-bruit σ du canal élémentaire ainsi constitué. N_b est alors obtenu en multipliant F par la quantité $\log_2(1 + \sigma)$ pour une onde cohérente spatialement, et $\log_2(1 + \sigma)^{\frac{1}{2}}$ dans le cas incohérent [36].

La conservation du nombre de degrés de liberté de l'onde au cours de la propagation en espace libre va se traduire par un produit espace \times bande-passante identique pour l'objet plan monochromatique O de la figure 2.1.b et sa transformée de Fourier spatiale F . Si l'on considère un objet à support limité $(\Delta x, \Delta y)$ et un support efficace⁴ $(\Delta u, \Delta v)$ pour F , le nombre d'échantillons indépendants de l'objet et sa TF sera égal à :

$$F = \frac{\Delta x \Delta y \Delta u \Delta v}{\lambda^2 z^2}, \quad (2.2)$$

λ étant la longueur d'onde de l'onde sphérique incidente. Au cours du passage continu de l'objet à sa TF par diffraction, chacun des F échantillons a été calculé en fonction des F points indépendants de l'objet O . Par analogie avec la transformée de Fourier discrète, F additions et F multiplications ont été mises en œuvre pour calculer chaque point, soit un total de $2F^2$ opérations élémentaires en parallèle. Les taux de transfert mis en jeu se chiffrent en Tbit/s. On peut également raisonner en termes de nombre d'interconnexions établies, soit F^2 dans ce cas. A titre d'exemple, si l'on considère que l'objet O a pour support une plaque holographique au standard 24×36 mm, donnée pour 1000 paires de lignes par mm, alors nous obtenons $F^2 = 7,5 \cdot 10^{17}$ interconnexions établies en parallèle !

Pour conclure, Ozaktas et Goodman [37] ont étudié le volume minimal V_{\min} requis pour établir un réseau de connexions optiques réparti arbitrairement dans l'espace. En supposant que les sources émettent une vibration quasi-monochromatique de fréquence centrale $\nu = c/\lambda$, les auteurs ont montré que $V_{\min} = \lambda^2 L/2\pi$, où L désigne la longueur totale des connexions présentes dans le système. Ce résultat peut être interprété de manière intuitive en considérant

³au sens de Shannon.

⁴selon un critère énergétique, pour ne pas contredire le principe d'incertitude de Heisenberg.

que chaque canal élémentaire possède une section minimale d'aire $\lambda^2/2\pi$, rejoignant le fait que deux points d'une surface d'onde ne peuvent être considérés comme indépendants si leur distance est inférieure à $\lambda/\sqrt{2\pi}$. Toutefois, lorsque l'on essaie de moduler ou de détecter ce front d'onde, on ne peut le faire qu'à l'échelle de dizaines de longueurs d'ondes. Les fortes capacités de l'optique en matière de traitement ou d'interconnexions spatiales ne semblent donc accessibles qu'aux systèmes analogiques transparents.

2.2 Système d'interconnexions tridimensionnelles

2.2.1 Modèle général

Outre les très larges bandes-passantes spatiales et temporelles accessibles en optique, les fronts d'ondes lumineux sont immunisés de manière naturelle vis-à-vis de la diaphonie⁵ [28], bien connue des télégraphistes ou des concepteurs de circuits électroniques. Les architectures pour lesquelles les données sont organisées de manière bi-dimensionnelle présentent alors un intérêt particulier, l'espace libre étant utilisé pour propager cette information d'un plan à l'autre. On obtient alors un système d'interconnexions tridimensionnel (3D), qui pourra revêtir deux formes : le réseaux d'interconnexions (RI) et le réseau de calcul (RC). Le premier a une fonction exclusive d'aiguillage ou de distribution de l'information. Dans un ordinateur parallèle, le RI est un sous-système important reliant le ou les processeurs à la mémoire et les contrôleurs d'entrée-sortie. A un plus bas niveau, on peut définir des interconnexions intra-processeur entre portes logiques. A des échelles opposées, les RI sont utilisés dans les réseaux de télécommunications pour interconnecter les équipements des réseaux de données, d'accès, métropolitains ou de transports des opérateurs. Le canal physique des connexions est la fibre optique, aux longueurs d'ondes de 850 nm (données), 1300 nm (accès) ou 1550 nm (dorsal). Dans les RI, seule la position de l'information est modifiée : le contenu n'est pas affecté. Ceci exclut la superposition de plusieurs entrées en un même point de sortie, contrairement au RC. Le schéma général d'un système d'interconnexions 3D est représenté sur la

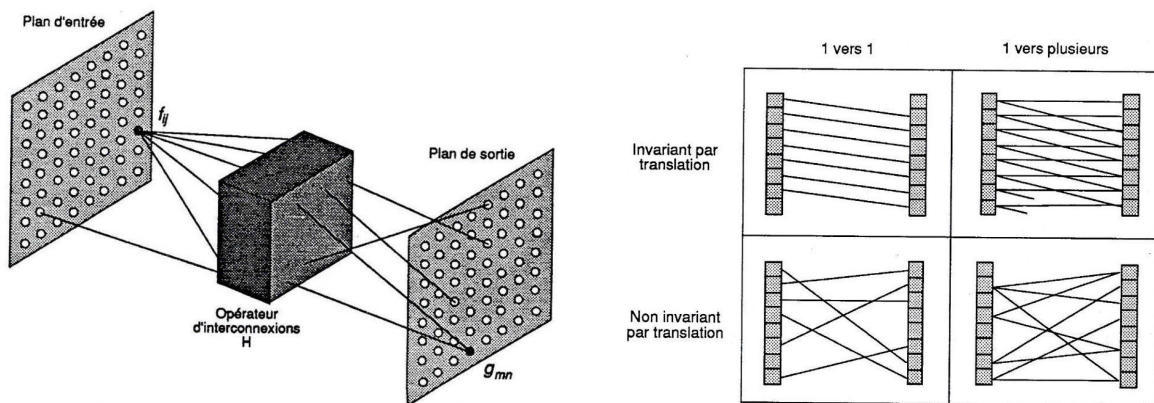


FIG. 2.2 – (a) Système d'interconnexions 3D – (b) Différentes topologies d'interconnexions spatiales, représentées à une dimension pour simplifier les schémas.

⁵ou intermodulation entre voies.

figure 2.2.a. On supposera que le plan d'entrée contient $I \times J$ canaux spatiaux répartis de manière régulière et espacés de d_x et d_y suivant les deux dimensions. La disposition régulière ne restreint pas la généralité du problème. L'objectif étant de transférer une grande quantité d'information par canal, on utilisera des sources présentant une grande bande-passante temporelle (typ. le Gbit/s). Le modèle physique de source d'entrée sera donc le *paquet d'ondes*⁶ émis par une source monochromatique de type laser (ou VCSEL) modulé, ou encore par une fibre optique alimentée à distance par les précédents. Le degré de cohérence mutuelle des sources sera à considérer en cas de superposition des réponses ou de diaphonie au niveau canaux de sortie.

L'information du plan d'entrée doit être transférée vers le plan de sortie contenant $M \times N$ canaux⁷, répartis uniformément selon un maillage rectangulaire de pas d_u et d_v . Les états lumineux du canal d'entrée (i, j) et du canal de sortie (m, n) sont notés f_{ij} et g_{mn} . Le modèle d'interconnexions associé à l'espace libre est une "boîte noire", dont l'action est décrite par un opérateur d'interconnexions H . Dans le cas général, l'état d'un canal de sortie (m, n) est simplement régi par une relation de superposition :

$$g_{mn} = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J H [i, j, m, n, f_{ij}] \quad (2.3)$$

Avec l'hypothèse supplémentaire de linéarité des connexions par rapport aux états d'entrée, nous avons $H [i, j, m, n, f_{ij}] = H(i, j, m, n) f_{ij}$. L'opérateur de connexions se comporte alors comme un système linéaire discret, de réponse impulsionnelle $H(i, j, m, n)$. De plus, si les points d'entrée sont traités de manière homogène, i.e. $H(i, j, m, n) = H(i - m, j - n)$, les interconnexions seront dites invariantes par translation (IT). De l'opérateur H , on peut extraire une structure logique des connexions en considérant l'opérateur binaire K , tel que $K(i, j, m, n) = 1$ si (i, j) et (m, n) sont connectés, et 0 dans le cas contraire. Ceci nous permet de définir la *sortance* σ_{ij} d'un canal d'entrée et l'*entrance* η_{mn} d'un canal de sortie par :

$$\begin{aligned} \sigma_{ij} &= \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N K(i, j, m, n) \quad \text{nombre de sorties connectées à l'entrée } (i, j) \\ \eta_{mn} &= \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J K(i, j, m, n) \quad \text{nombre d'entrées connectées à la sortie } (m, n) \end{aligned}$$

Si l'on caractérise les connexions par l'invariance spatiale et le type de sortance des entrées, les quatre topologies possibles sont schématisées sur la figure 2.2.b. Enfin, le nombre de *degrés de liberté* du système d'interconnexions peut s'exprimer par $F = T I J$, où T est le nombre d'interconnexions indépendantes opérées par le système. Le cas d'interconnexions IT correspond à $T = 1$. A l'opposé, des connexions non-invariantes (NIT), pour lesquelles chaque point d'entrée est traité de manière différente, possèdent $F = M N I J$ degrés de liberté.

⁶onde quasi-monochromatique.

⁷Physiquement, des photodiodes ou des guides d'ondes optiques tels que des fibres.

2.2.2 Codage optique du tenseur d'interconnexions

Dans le cas le plus général, le tenseur d'interconnexions défini par la relation 2.3 est de dimension 4, et sa représentation physique requiert un codage adapté à un milieu de stockage physique de dimension forcément inférieure. Deux familles de solutions reposant sur l'holographie pour coder les poids des connexions et effectuer la somme (2.3) dans sa version linéaire ont été proposées. La première utilise le multiplexage angulaire d'hologrammes dans les milieux épais [38] et la sélectivité angulaire à l'angle de Bragg. L'utilisation de matériaux dynamiques de type photo-réfractifs permet en outre d'obtenir des liens reconfigurables [39]. La seconde solution est une approche planaire utilisant des matrices d'hologrammes, ou hologrammes à facettes multiples (HFM) [40]. Si la densité d'interconnexions accessible est plus forte dans le premier cas, le contrôle de l'information stockée est bien supérieur dans le second, éliminant l'intermodulation de réseau et la diaphonie induite par l'approche volumique [41]. Nous avons donc privilégié l'approche planaire dans les travaux présentés dans ce chapitre, ainsi que les suivants.

La mise en œuvre d'interconnexions invariantes par translation (IT) repose en partie sur la capacité de l'optique à former des images. Nous prendrons deux exemples à titre d'illustration. Le premier consiste en une imagerie effectuée au moyen d'un objectif stigmatique, pour laquelle les distributions d'amplitude de l'objet et de l'image vérifient $U_i(x', y') = U_0(\gamma x, \gamma y)$, γ étant un facteur de grandissement positif. On a ainsi un schéma d'interconnexions IT de type 1 vers 1, sans pondération intermédiaire. Une opération similaire peut être obtenue à l'aide d'une configuration $4f$ de type corrélateur de Vanderlugt. L'introduction d'un illuminateur de tableau de type réseau de Damman [42] dans le plan intermédiaire permet d'obtenir une imagerie multiple (p ordres de diffraction uniformes) dans le plan de sortie. Chaque point du plan d'entrée voit ainsi des interconnexions IT de sortance $\sigma = p$ (figure 2.3.a). Les interconnexions non-invariantes par translation (NIT) représentent le cas

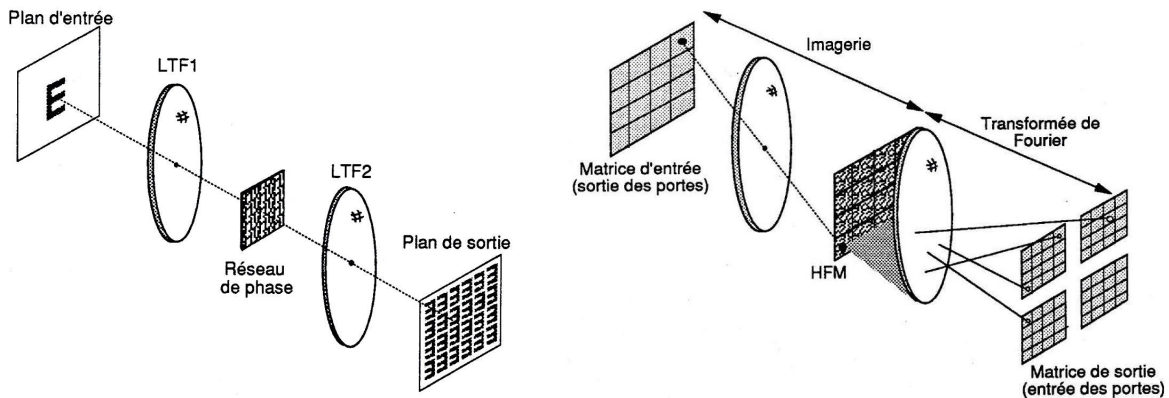


FIG. 2.3 – (a) Interconnexions 3D invariantes par translation par filtrage spatial – (b) Interconnexions 3D non-invariantes par translation.

le plus fréquent, en raison de la variété des topologies autorisées. L'élément-clé pour le codage est un hologramme à modulation de fréquence spatiale que l'on vient placer devant le plan d'entrée. Si la variation de fréquence spatiale est discontinue, on parle d'hologramme à facettes multiples (HFM), telle la solution proposée par Jenkins [40] au titre d'alternative

au multiplexage angulaire holographique dans les matériaux épais⁸. Dans ce cas, chaque canal d'entrée est mis en correspondance avec sa facette via un système imageur (fig. 2.3.b). Chaque facette est un Hologramme synthétisé par ordinateur (HSO) codé dans le domaine de Fourier, présentant l'avantage de fournir des connexions invariantes en éclairissement au positionnement dans le plan intermédiaire. Les interconnexions NIT de type "1 vers 1" (fig. 2.2.b) rentrent dans la catégorie des transformations de coordonnées. Nous allons détailler notre contribution dans ce domaine dans la section suivante 2.3.

2.3 Transformations géométriques holographiques

2.3.1 Contexte

Le travail présenté dans cette section est le fruit d'une collaboration avec le département "Signal et Images" de TELECOM LILLE 1, dans le cadre de travaux portant sur les invariants tridimensionnels en reconnaissance de forme. Nos partenaires recherchaient une méthode de calcul rapide –et a priori parallèle– de transformations géométriques sur des objets plans.

Les transformations géométriques sont des opérations utilisées en reconnaissance de formes (2D ou 3D) pour compenser des distorsions connues dans les scènes à analyser. L'expression la plus générale d'une transformation géométrique entre un plan d'entrée de coordonnées (x, y) et un plan de sortie (u, v) utilise une équation implicite de la forme $T(x, y, u, v) = 0$. Dans ce cas, plusieurs points de sortie peuvent être associés au même point d'entrée. Il s'agit, par analogie avec les interconnexions 3D, de liens à sortance multiple. A titre d'illustration, on peut citer le cas de la transformée de Hough [43], définie par la relation $T(x, y) = u - x \cos v - y \sin v$. Cette primitive est notamment utilisée pour détecter des formes de base telles que les lignes droites ou les cercles.

De manière plus spécifique, lorsqu'une transformation géométrique est définie par un couple d'équations explicites $u = u(x, y)$ et $v = v(x, y)$, on parlera de transformation de coordonnées (TC), et un point de sortie unique sera associé à chaque point d'entrée, même si plusieurs points d'entrée peuvent être associés au même point de sortie. En termes d'interconnexions, on aura des liens à entrance multiple.

L'implantation matérielle d'une transformation géométrique réalisée en optique libre permet de tirer parti du parallélisme naturel de la propagation de faisceau. L'optique diffractive cohérente apporte encore ici toute sa flexibilité, comme le montra Bryngdahl [44] en proposant une méthode de calcul d'un hologramme de phase (ou Kinoforme) transformant un faisceau monochromatique incident à la manière d'un réseau de diffraction généralisé. Plus précisément, si $f(x, y)$ désigne l'amplitude complexe du front d'onde dans le plan d'entrée E , on recherche la phase modulante $\phi(x, y)$ qui produira le front d'onde désiré $g(u, v)$ dans le plan de Fourier de E , situé à l'infini ou au foyer image d'une lentille convergente de focale f . Mathématiquement, si \mathcal{F} désigne la transformation de Fourier, la fonction de phase $\phi(x, y)$ sera solution de l'équation :

$$g(u, v) = i\alpha\mathcal{F}[fe^{i\phi}](\alpha u, \alpha v) \quad (2.4)$$

⁸L'objectif de l'auteur était d'implanter un système d'interconnexions optiques à haute densité entre matrices de portes logiques optiques, intégrées sur un circuit électronique.

avec $\alpha = -1/\lambda f$ (en vertu de la relation 2.1...). La solution de Bryngdahl consiste à estimer l'intégrale de Fourier de l'équation (2.4) par la méthode de la phase stationnaire [45], menant à la solution :

$$\frac{\partial \phi}{\partial x} = -2\pi\alpha u(x, y) \quad \text{et} \quad \frac{\partial \phi}{\partial y} = -2\pi\alpha v(x, y) \quad (2.5)$$

Ces équations aux dérivées partielles ont des solutions si et seulement si la fonction complexe définissant la TC, i.e. $\mu : x + iy \mapsto u + iv$, est holomorphe⁹. Dans l'étude rapportée en [9], nous nous sommes intéressés à la transformation "cartésienne-log polaire" (CLP), définie par la relation :

$$\mu(x + iy) = a \ln r - ib\theta = u + iv \quad (2.6)$$

où (r, θ) est la forme polaire de (x, y) et a et b sont des facteurs d'échelles réels et positifs. Cette transformation holomorphe permet d'obtenir des scènes invariantes par rotation et changement d'échelle dès lors que l'on se place dans le domaine de Fourier. En résolvant (2.5) et (2.6), nous avons calculé numériquement la phase de Bryngdahl ϕ_B représentée sur la figure 2.4.a. En éclairant l'hologramme ϕ_B simulé via le masque d'amplitude en anneau

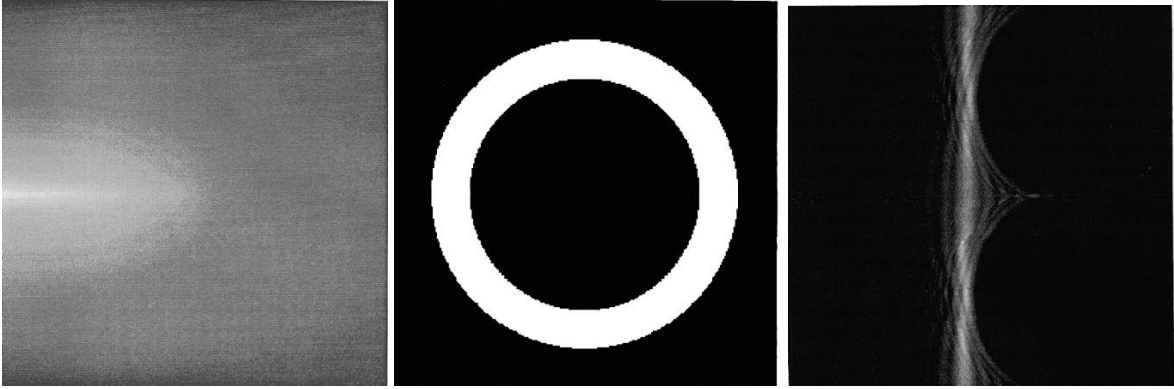


FIG. 2.4 – (a) Représentation de la phase de Bryndahl – (b) image d'entrée, dont la transformation CLP est une bande verticale uniforme – (c) transformation de l'image (b) par la phase (a).

binaire de la figure 2.4.b, on obtient la figure de diffraction représentée sur la figure 2.4.c. Les irisations et non-uniformités dans la reconstruction sont causées par l'approximation de la phase stationnaire et la diffraction par les bords de l'anneau. Le test expérimental de la méthode implique le passage de l'hologramme théorique à l'hologramme de phase physique (kinoforme). Ce dernier peut être réalisé de manière analogique (e.g. par photoréduction d'une diapositive reproduisant les variations spatiales de ϕ_B) et blanchiment photographique) ou de manière numérique (photo-lithographie d'un matériau d'indice à partir de masques photoréduits de ϕ_B). Dans les deux cas, des non-linéarités seront introduites et la reconstruction sera dégradée par rapport à la figure 2.4. Cette contrainte sera intégrée dans la section suivante.

La méthode de Bryngdahl n'étant pas applicable à une transformation géométrique quelconque (non analytique), des solutions alternatives ont été proposées. La plus intéressante est l'approche *multi-facettes*, consistant à échantillonner spatialement le plan d'entrée en

⁹fonction à valeurs dans \mathbb{C} , définie et dérivable en tout point d'un sous-ensemble ouvert du plan complexe.

$N \times N$ cellules de résolution, et de faire correspondre à chaque cellule un hologramme restituant le point (TC) ou la forme associée (TG) dans le plan de sortie (de Fourier). Ambs et ses co-auteurs ont ainsi proposé l'implantation d'une transformée de Hough par enregistrement automatisé d'une matrice de 256×256 hologrammes analogiques de $250 \mu\text{m}$ de côté [46]. Ce processeur parallèle de Hough a permis de détecter en temps-réel des figures composées de droites, cercles et ellipses, et la méthode a pu être étendue à d'autres types de transformations ou interconnexions variantes dans l'espace.

2.3.2 Approche itérative

Reprenant le principe de l'approche multifacettes, nous avons proposé une modification de la méthode de Bryngdahl, dans le but d'améliorer la qualité d'une transformation géométrique tirant parti de la souplesse de calcul des HSO. La reconstruction optique s'effectuant dans le plan de Fourier de l'hologramme de transformation, il semble légitime d'introduire à ce niveau une procédure itérative à transformée de Fourier. De ce point de vue, l'algorithme de Gerchberg-Saxton (GS) [47] est un outil simple et efficace. Il fut conçu à l'origine pour reconstruire la phase de distributions lumineuses liées par une transformation de Fourier, dont seuls les éclaircissement étaient connus¹⁰. Le schéma de principe de l'algorithme proposé est indiqué sur la figure 2.5.a. Notre approche consiste à utiliser la phase de Bryngdahl comme solution initiale de l'algorithme de GS, après avoir découpé le plan d'entrée ($z = x + iy$) en une base de formes spatiales (i_1, \dots, i_N) représentatives de la transformation géométrique à réaliser, d'intersection vide et d'union recouvrant le plan d'entrée. Les formes "idéales" de sortie (o_1, \dots, o_N) sont établies dans le plan $w = u + iv$ à l'aide de la transformation $o_k(w) = i_k[\mu^{-1}(w)]$. Pour la transformation CLP, un choix possible de formes d'entrée/sortie est une série d'anneaux concentriques d'épaisseur croissante pour l'entrée, produisant des bandes verticales parallèles et de largeur constante en sortie (figure 2.5.b). On applique l'algorithme de GS à chaque paire (i_k, o_k) en partant de la phase de Bryngdahl comme solution initiale. Le cœur de la procédure itérative 2.5.a est une troncature spatiale dans les plans d'entrée et de sortie suivant les gabarits associés aux formes i_k et o_k . Les simulations numériques sont réalisées sur des images d'entrée comportant 256×256 cellules de résolution, chacune d'entre elles codées sur 8×8 pixels. Après passage de l'algorithme itératif sur les 8 anneaux d'entrée, la phase de Bryngdahl modifiée ϕ_B^{mod} obtenue est testée sur l'anneau i_7 de la figure 2.4.b, menant à la bande reconstruite en 2.6.a. L'amélioration de la qualité de la reconstruction se mesure par l'erreur quadratique moyenne entre les référence o_k utilisées dans l'algorithme de GS et les reconstruction simulées à partir des hologrammes de phase initiaux et finaux. On mesure une réduction de l'erreur de 25% entre la solution de Bryngdahl et notre méthode itérative. En revanche, des tests de transformation CLP sur des images d'entrée n'appartenant pas aux formes de base o_k utilisées dans l'algorithme ne montrent pas d'amélioration significative par rapport à la phase de Bryngdahl. Ceci montre que la fonction de phase ϕ_B^{mod} a été spécialisée pour l'ensemble (i_1, \dots, i_N).

A titre de vérification expérimentale, la phase calculée par l'algorithme itératif a été quantifiée sur deux niveaux $(0, \pi)$ selon la méthode de diffusion d'erreur [48]. On obtient un hologramme binaire d'amplitude dont une portion est représentée sur la figure 2.6.b. Après fabrication de l'hologramme et illumination via l'anneau de référence de la figure 2.5.b, on

¹⁰Problème bien connu en astronomie.

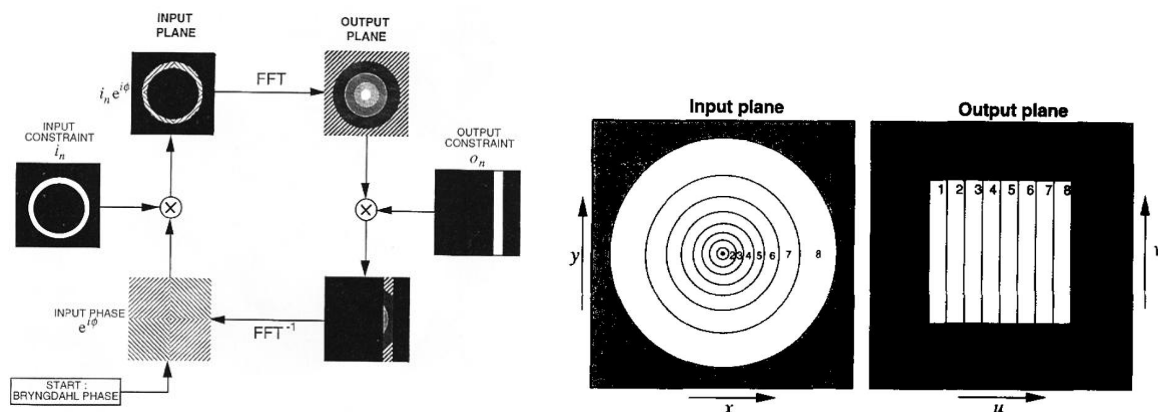


FIG. 2.5 – (a) Structure de l’algorithme itératif de transformation de coordonnées – (b) base de formes d’entrée/sortie adaptées à la transformation CLP.

obtient le plan de reconstruction de la figure 2.6.c, dont l’erreur quadratique moyenne de la reconstruction est très proche de celle de la reconstruction 2.6.a.

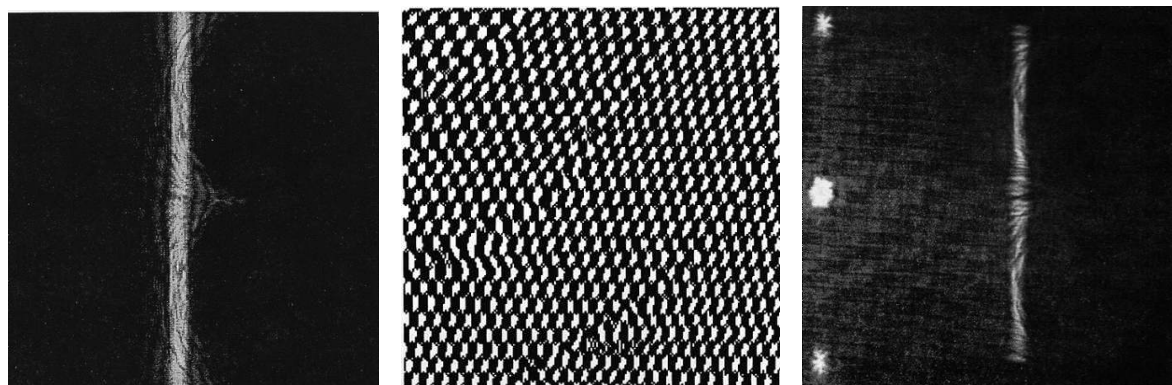


FIG. 2.6 – (a) transformation de l’anneau de référence par la phase ϕ_B^{mod} , calculée de manière itérative – (b) Portion du HSO obtenu après binarisation de la phase ϕ_B^{mod} (sur 1024×1024 pixels) – (c) transformation optique de l’anneau de référence par l’hologramme précédent. On note la présence de l’ordre 0 de diffraction.

2.3.3 Généralisation : transformations non-analytiques

Nous avons généralisé la procédure décrite précédemment à des transformations géométriques non-analytiques, pour lesquelles la phase de Bryngdahl n’est pas disponible. Nous nous sommes également fixés d’intégrer l’opération de quantification des niveaux de l’hologramme au processus itératif de calcul de la fonction de phase, dans le but de minimiser l’erreur de reconstruction dans le plan de transformation de coordonnées. Les formes de base sont maintenant constituées d’un pavage du plan d’entrée sous forme de facettes élémentaires, et l’on bascule alors dans un problème de concentration énergétique dans une zone de dimension finie du plan de Fourier, à partir d’une facette holographique de taille

finie (figure 2.7.a). Le choix de la forme et de la disposition des facettes n'est pas anodin

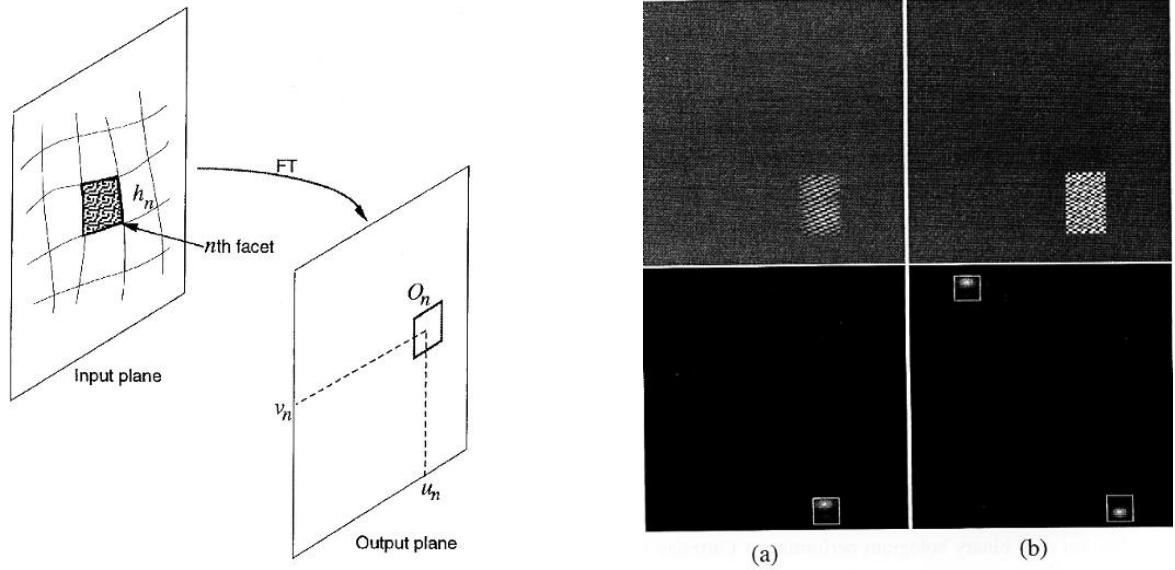


FIG. 2.7 – (gauche) Principe de concentration énergétique maximale en une zone du plan de sortie, au moyen d'une facette holographique de taille limitée dans le plan d'entrée – (droite) Simulation de concentration énergétique avec une facette à phase continue (a) : la concentration énergétique mesurée est de 97 %, et (b) avec une facette à phase binaire : la concentration énergétique dans chacun des domaines symétriques est de 33 %.

et doit être effectué en fonction de la transformation visée. Ainsi, pour une TC cartésienne-polaire (non-holomorphe), on pourra choisir des facettes rectangulaires arrangées selon des anneaux concentriques. Si $h_n(x, y)$ désigne la transmittance de la facette n "visant" le point de sortie (u_n, v_n) , celle-ci s'exprimera sous la forme d'une fonction de fenêtrage¹¹ w_n telle que

$$h_n(x, y) = w_n(x, y) \exp [2i\pi(u_n x + v_n y)]$$

Pour chaque cellule d'entrée (facette), de taille et de position donnée, la valeur théorique de la fonction w_n sera celle qui maximise la concentration énergétique dans une cellule de sortie o_n entourant le point (u_n, v_n) , définie par le rapport :

$$\alpha = \frac{\iint_{o_n} |H_n(u, v)|^2 \, dudv}{\iint_{\mathbf{R} \times \mathbf{R}} |H_n(u, v)|^2 \, dudv} \quad (2.7)$$

H_n désignant la transformée de Fourier de h_n . Ce problème avait été traité dans le cas monodimensionnel par Slepian [49], aboutissant aux fonctions ellipsoïdales¹², exprimables sous forme d'une fonction explicite de α et des supports spatiaux et fréquentiels. Deux différences dans notre cas : (i) les fonctions sont bidimensionnelles et la taille et la forme des cellules

¹¹ou d'apodisation : suppression des "pieds", ou suroscillations dus à la taille finie de la facette (phénomène de Gibbs).

¹²Prolate spheroidal wave functions.

sont des degrés de liberté supplémentaires, (ii) les solutions doivent être quantifiées et codées sur un nombre fini de niveaux de phase pour réaliser un hologramme digital. Il n'existe donc pas de solution explicite au problème. Nous avons donc poursuivi dans une démarche itérative entre le plan d'entrée et son plan de Fourier, d'autant plus que les fonctions ellipsoïdales sont connues pour être invariantes par l'opérateur "troncature + transformée de Fourier". Nous avons incorporé l'opération de quantification des niveaux dans l'algorithme de GS,

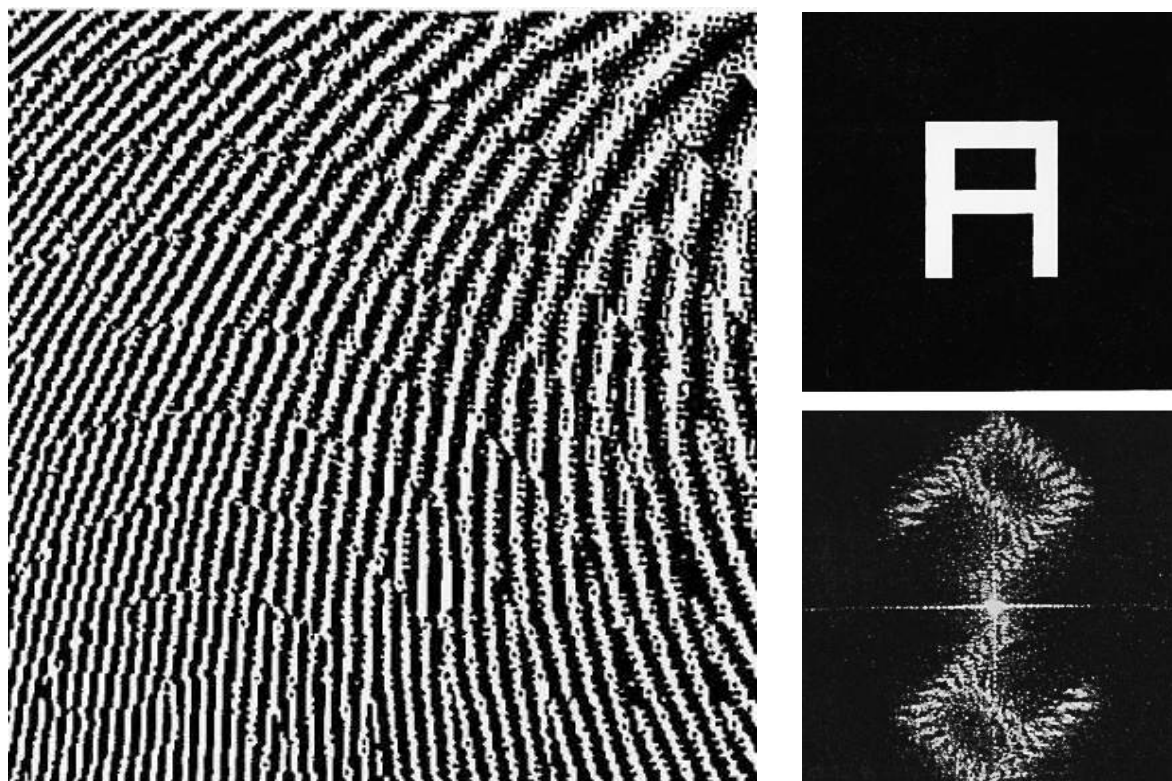


FIG. 2.8 – (gauche) Portion d'un hologramme binaire calculé pour effectuer une rotation de 45° des images d'entrée – (droite) image test d'entrée et résultat de la transformation de l'image d'entrée par l'hologramme de gauche, acquise au moyen d'une camera CCD.

rejoignant par certains aspects l'algorithme de calcul d'hologramme digital à transformée de Fourier itérative (IFTA) Des résultats intéressants pour différents types de transformation de coordonnées non analytiques ont été obtenus [9], dont une rotation de 45° , illustrée sur la figure 2.8. Les tavelures perceptibles dans la reconstruction 2.8.b sont provoquées par l'éclairage cohérent et les interférences entre contributions de facettes adjacentes et de taille finie. Dans ce cas, la précision du calcul peut être améliorée par l'utilisation d'un diffuseur aléatoire dans le plan de l'objet.

Cette étude a été menée avec entrain et rigueur par Noëlle Nochez, lors de son stage de DEA, suivi d'une première année de thèse. Pour des raisons personnelles, elle n'a pas souhaité poursuivre ces travaux pour rejoindre le monde de l'industrie. Je l'ai déploré à l'époque, mais ce sont là des choix individuels...

En guise de bilan sur cette étude, nous ferons deux remarques. La première est que nous

avons tenté une incursion dans le monde des transformations continues, en introduisant des méthodes numériques impliquant une discrétisation du plan d'entrée. Même si nous avons étendu la méthode de Bryngdahl à des transformations quelconques, la précision de la transformation n'est pas assurée pour toute image d'entrée. Le point central est la discontinuité des franges introduites dans l'hologramme par la méthode itérative. Ce point n'a pas été approfondi, par manque de temps. La deuxième remarque est que l'algorithme développé prend tout son sens dès lors que l'on considère une transformation géométrique vers un plan de sortie discrétisé, formé de canaux isolés tels que des éléments de photo-détection. Dans ce cas, le processus d'acquisition spatiale de l'éclairement (non-linéaire) peut être intégré dans le calcul des facettes de l'hologramme d'entrée, comme nous l'avons montré en [50]. La section suivante en présente le contexte et les principaux développements.

2.4 Réseau de calcul à plan de nœuds

2.4.1 Principe

Dans le cadre d'une étude proposée et financée par la DRET au début des années 1990, Je me suis intéressé au potentiel des systèmes d'interconnexions optiques pour implanter des primitives d'intelligence artificielle telles que le moteur d'inférence [51] et l'élagage d'arbre décisionnel [2]. Ceci a constitué le thème central de mon doctorat. Le problème s'est assez rapidement recentré sur l'implantation optique de manipulations intensive de matrices booléennes sous forme de multiplications simples ("ET" logique) et de multiplications matricielles. Réalisée optiquement (donc de manière parallèle), le temps de calcul des opérations devenait alors indépendant de la taille des matrices. Contrairement aux transformations de coordonnées vue à la section précédente 2.3, le problème posé ici se modélise via un réseau de calcul, dont les interconnexions devront intégrer :

- des *poids* variables, traduisant la force des liens entre les points du plan d'entrée et de sortie. La plupart du temps, ces poids sont des coefficients multiplicateurs complexes.
- la possibilité de *superposition*, en un même point du plan de sortie, de plusieurs signaux issus du plan d'entrée.
- une phase de *décision* dans le plan de sortie, opération non-linéaire réalisée par une photo-détection suivie d'un seuillage.

Comme nous l'avons vu en section 2.3, l'utilisation d'une architecture planaire multifacettes permet d'implanter un réseau d'interconnexions 3D, dans des configuration NIT. Cependant, l'emploi d'hologrammes fixes rend, par essence, cette architecture statique. Si les états d'entrée et de sortie sont représentés à l'instant t par une matrice $A(t)$, de taille $N \times N$, l'état de sortie au point (m, n) de la matrice C est donné par la version linéaire de la relation 2.3 :

$$C_{mn}(t) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N T_{ijmn} A_{ij}(t), \quad 1 \leq i, j, m, n \leq N \quad (2.8)$$

Cette relation décrit une superposition incohérente (en éclairage) si les sources d'entrée représentant la matrice $A(t)$ émettent des vibrations mutuellement incohérentes. A titre d'illustration, si les éléments du tenseur T vérifient la relation $T_{ijmn} = \delta(m - i)B_{jn}$, où δ désigne

le symbole de Kronecker¹³ et B est une matrice fixe de taille $N \times N$, on vérifie que la relation 2.8 devient une multiplication matricielle $C(t) = A(t)B$.

Ce modèle peut être également utilisé pour représenter les interactions d'ordre 1 au sein d'un réseau de neurones artificiels¹⁴, où le tenseur T s'identifie alors à la matrice synaptique du réseau [52]. Ainsi, pour un état d'entrée de la carte neuronale représenté par la matrice $X = \{X_{ij}\}$, $1 \leq i, j \leq N$, le réseau évolue globalement vers un état de sortie représenté par la matrice $Y = \{Y_{mn}\}$, $1 \leq m, n \leq N$, telle que :

$$Y_{mn} = \mathcal{S} \left[\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N T_{ijmn} X_{ij} \right], \quad (2.9)$$

où $\mathcal{S}(\cdot)$ est un opérateur non-linéaire représentant une décision (e.g. seuillage). L'élément T_{ijmn} de la matrice synaptique correspond au poids de la connexion entre les unités (i, j) et (m, n) , initialisé lors de la phase d'apprentissage. A l'image de la multiplication matricielle, le tenseur des poids est ici figé par l'emploi d'hologrammes fixes.

Nous avons alors introduit de la reconfigurabilité à ce type d'architecture à base de matrices de HSO planaires, en proposant un modèle d'interconnexions générique dit "nodal" [3]. Ce dernier est défini par la relation générale 2.8, mais le tenseur d'interconnexions (ou nœud) devenait reconfigurable dans le temps selon une loi séparable temporellement et spatialement :

$$T_{ijmn}(t) = W(t)\Phi_{ijmn} \quad (2.10)$$

Ceci nous a permis de représenter l'activité du nœud à un instant donné t , par son poids $W(t)$, à valeurs réelles ou complexes. Ce paramètre évolue dans le temps avec l'activité du nœud, qui peut même s'annuler si $W(t) = 0$. Les réponses spatiales Φ_{ijmn} sont supposées stationnaires dans le temps. Selon la forme séparable 2.10, une implantation optique s'impose : un poids W confié à un modulateur spatial de lumière reconfigurable (électriquement ou optiquement), ce dernier modulant un HFM contenant les réponses spatiales Φ_{ijmn} . Le nombre de paramètres requis pour spécifier un nœud dépendait alors de l'opération effectuée par le RIPN et du nombre maximal de réponses spatiales indépendantes, i.e. le degré d'invariance spatiale de $[\Phi]$. Dans le pire des cas, il faut connaître N^4 réponses spatiales et une valeur de poids. Cette quantité peut être réduite si $[\Phi]$ présente des propriétés de symétrie, à identifier en fonction de l'application visée.

Après avoir introduit le nœud d'interconnexions, on a construit le modèle global interconnectant les plans d'entrée et de sortie au moyen d'un plan intermédiaire rassemblant $M \times M$ nœuds. Le nœud (k, l) est caractérisé par son tenseur spatial $[\Phi^{kl}]$ et son poids $W^{kl}(t)$ à l'instant t . La contribution du nœud (k, l) au point de sortie (m, n) , lorsque le plan d'entrée est décrit par la matrice d'états $A(t)$, s'exprime par la quantité :

$$C_{mn}^{kl}(t) = W^{kl}(t) \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \Phi_{ijmn}^{kl} A_{ij}, \quad (2.11)$$

¹³vérifiant $\delta(x) = 1$ pour $x = 0$ et 0 sinon.

¹⁴ou réseau neuromimétique, dans la communauté informatique de l'époque.

La réponse globale du réseau d'interconnexions à plan de nœuds (RIPN) à la sortie (m, n) s'exprime alors par sommation sur l'ensemble des M^2 nœuds (figure 2.9) :

$$C_{mn}(t) = \sum_{k=1}^M \sum_{l=1}^M \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \Phi_{ijmn}^{kl} A_{ij} W^{kl}(t) \quad (2.12)$$

On peut fournir deux applications immédiates du RIPN. Il peut être d'abord configuré en

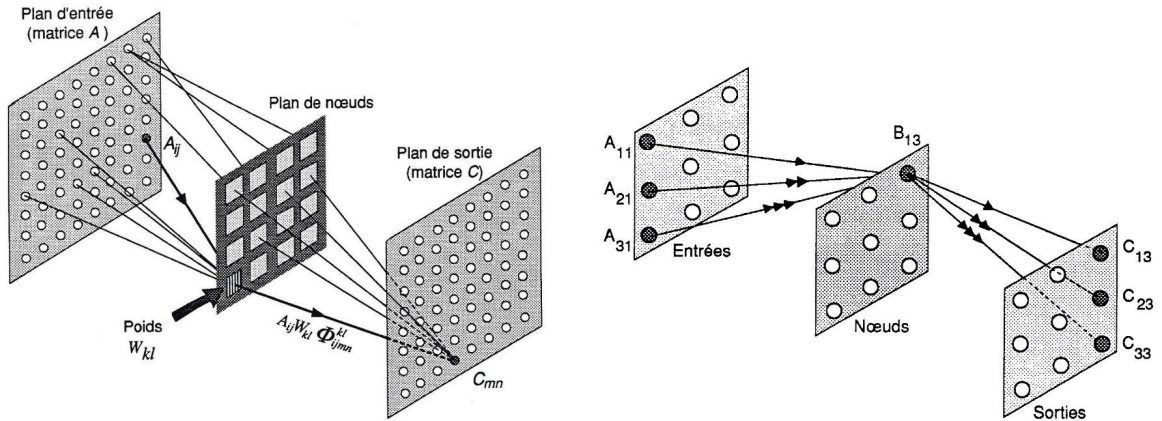


FIG. 2.9 – (a) Schéma général du RIPN – (b) Rôle d'un nœud dans le cas d'une multiplication matricielle 3×3 .

multiplier entre matrices $A(t)$ et $B(t)$ présentant chacune des termes variables, contrairement à l'expression 2.8 où la matrice B était statique. En supposant des matrices de taille $N \times N$, on choisira $N \times N$ nœuds et l'élément (k, l) sera défini par :

$$\begin{cases} W^{kl}(t) = B_{kl}(t) \\ \Phi_{ijmn}^{kl} = \delta(j - k)\delta(m - i)\delta(n - l) \end{cases} \quad 1 \leq i, j, m, n \leq N \quad \text{et} \quad 1 \leq k, l \leq M. \quad (2.13)$$

En injectant ces valeurs dans l'expression 2.12, on retrouve bien le produit matriciel. La forme particulière de la relation 2.13 suggère que l'élément (k, l) de la matrice B se conduit comme un nœud d'interconnexions entre la colonne k de A et la colonne l de C . L'entrance et la sortance du nœud valent donc ici N . L'action d'un nœud de la matrice B est schématisée sur la figure 2.10.b, dans le cas où $N = 3$.

Le RIPN peut également modéliser les interactions dynamiques au sein d'un réseau de neurones 2D du premier ordre, définies par la relation 2.9 et modifiables grâce au tenseur variable décrit par l'expression 2.12. Il a cependant été démontré que les réseaux de neurones d'ordre supérieur présentent des capacités de stockage et d'apprentissage supérieures à celles des réseaux de premier ordre (linéaires) [53], et possèdent des propriétés naturelles d'invariance vis-à-vis de certaines transformations géométriques [54]. Leur implantation nécessite toutefois des densités d'intégration très importantes sur circuit silicium. La figure 2.10.a schématise les interactions d'ordre 2 d'un réseau de neurones monodimensionnel. Si les neurones sont disposés de manière naturelle vis-à-vis de l'optique, i.e. selon une grille bidimension-

nelle (figure 2.10.b), ces interactions d'ordre 2 sont décrites par la relation :

$$Y_{mn}(t) = \mathcal{S} \left\{ \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N W_2(i, j, k, l, m, n) X_{ij} X_{kl} \right\} \quad (2.14)$$

où X et Y représentent les matrices d'états d'entrée et de sortie des neurones du réseau, et les termes $W_2(\cdot)$ sont les poids d'ordre 2 entre les neurones, initialisés lors de la phase d'apprentissage. On vérifie bien que l'expression précédente 2.14 correspond à un cas particulier de la réponse générale du RIPN (2.12), avec les conditions suivantes :

- (i) les réponses du nœud (k, l) sont choisies telles que $\Phi_{ijmn}^{kl} = W_2(i, j, k, l, m, n)$,
- (ii) on présente la matrice d'états X à reconnaître à la fois comme matrice d'entrée A , et comme matrice de poids des nœuds W ,
- (iii) l'opération réalisée par le RIPN est suivie d'une prise de décision $\mathcal{S}(\cdot)$

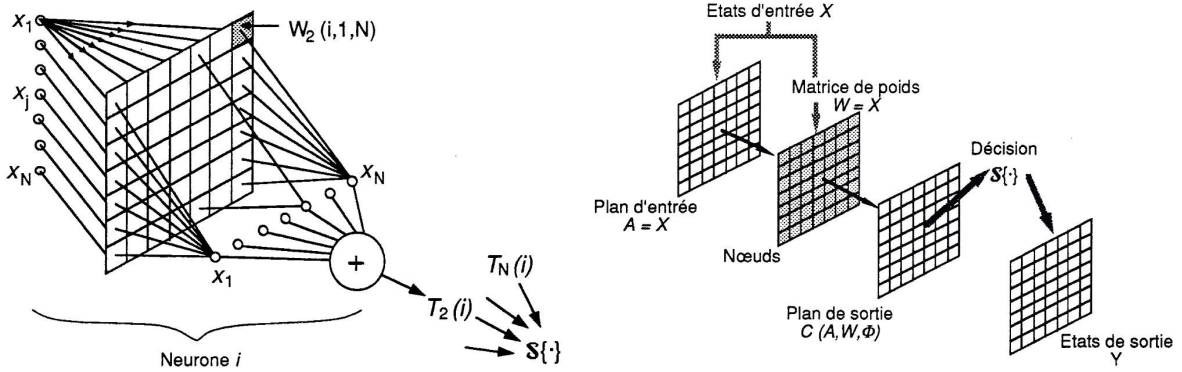


FIG. 2.10 – (a) Interactions d'ordre deux, au sein d'un réseau de neurones monodimensionnel comportant N unités. $W_2(i, 1, N)$ désigne le poids entre les unités $i, 1$ et N – (b) Traitement des interactions neuronales d'ordre 2 au moyen du RIPN.

2.4.2 Implantation optique du RIPN et résultats expérimentaux

Conformément aux arguments avancés en section 2.2.2 (page 20) nous avons retenu une méthode de codage planaire des interconnexions au moyen de matrices de HFM synthétiques. Le nœud d'interconnexions (k, l) est constitué d'un HFM, noté H^{kl} et d'un MSL opérant en transmission, servant à introduire le poids du nœud W^{kl} . Le nombre de facettes requises pour H^{kl} est égal au nombre d'entrées susceptibles d'adresser le nœud, soit son entrée η_{kl} . Afin que les nœuds puissent opérer, il est nécessaire de leur communiquer les valeurs de la matrice d'entrée A . Pour une application donnée du RIPN, chaque entrée (i, j) ne voit a priori qu'un ensemble fini \mathcal{N}_{ij} de nœuds. Conformément à la figure 2.11.a, l'image de l'entrée A_{ij} est donc répliquée exclusivement vers \mathcal{N}_{ij} via la facette dédiée d'un premier HFM (HFM1). Cette facette (i, j) adresse la ij -ième facette de H^{kl} , notée H_{ij}^{kl} , avec un éclaircissement relatif A_{ij} . Comme H_{ij}^{kl} a été calculé de manière à produire les réponses spatiales Φ_{ijmn}^{kl} en chaque point du plan de sortie, la contribution lumineuse au niveau de la sortie

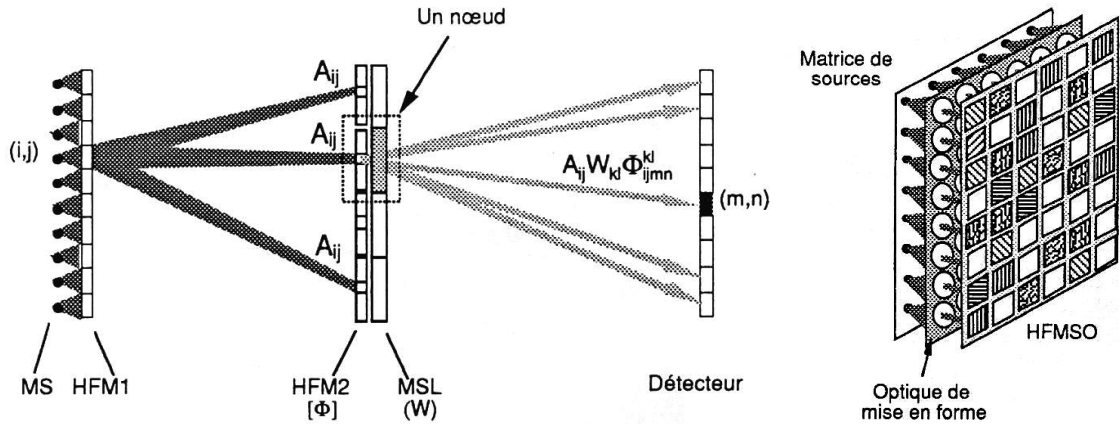


FIG. 2.11 – Schéma monodimensionnel de l'architecture du RIPN. MS = matrice de sources. Seules les contributions d'une entrée et d'un nœud ont été représentées – (b) Vue 2D du plan d'entrée. Une matrice de micro-lentilles peut servir d'optique de mise en forme entre les sources d'entrée et le HFM d'entrée.

(m, n) représente bien, via le modulateur spatial introduisant le poids nodal $W^{kl}(t)$, la valeur $A_{ij} W^{kl} \Phi_{ijmn}^{kl}$. La mise en cascade de deux composants diffractants peut toutefois limiter cette architecture en précision et en capacité, par :

1. les pertes induites, dues à l'efficacité de diffraction limitée de chaque HFM et aux divisions de faisceau induites,
2. les aberrations des sources et optiques de mise en forme entre le plan d'entrée et le plan de nœuds,
3. les inhomogénéités de faisceau et la diaphotie spatiale induites dans le plan nodal, dues à la taille finie et à la quantification des niveaux d'amplitude et/ou de phase des facettes de HFM1. La figure 2.12.a est une simulation de la forme d'onde d'illumination de HFM2, pour différentes valeurs du paramètre de troncature de la facette de HFM1.

La quantification des points 1. et 3. a été étudiée en détails dans l'une de nos publications [55], fournie en partie III. La conclusion de ce qui précède est qu'il est indispensable de régénérer les fronts d'onde en éclairement et uniformité avant le plan de nœuds. Pour ce faire, au lieu de cascader directement les deux étages holographiques, on a intégré au plan de nœuds une "valve optique", sous la forme d'un modulateur spatial de lumière adressable optiquement (MSLAO), comme indiqué sur la figure 2.12.b. A l'image d'une émulsion photographique, le comportement du composant est non-linéaire vis-à-vis de l'éclairement incident. La distribution d'amplitude complexe $F_{ij}(u, v)$ émanant de la facette d'entrée (i, j) sera enregistrée dans le MSLAO sous forme d'une variation de transmittance $t_{\text{MSL}}(u, v)$ telle que

$$t_{\text{MSL}}(u, v) = \mathcal{G} \left\{ |F_{ij}(u, v)|^2 \right\} \quad (2.15)$$

où \mathcal{G} désigne la loi caractéristique en écriture du MSL. Le composant utilisé est un MSL à cristaux liquides ferroélectriques (FLC), à structure dite stabilisée par la surface [56]. L'adressage optique à l'écriture est basé sur l'association d'une couche de photoconducteur (silicium amorphe) et d'une couche de FLC placées entre deux électrodes transparentes

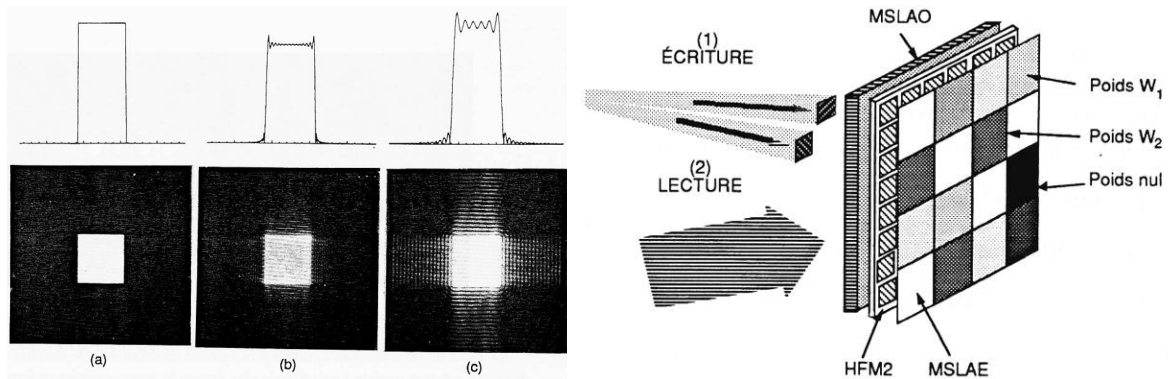


FIG. 2.12 – (a) Simulations réalisées sur 256×256 points – (b) Structure du plan de nœuds intégrant un MSLAO.

d'ITO¹⁵ (figure 2.13.a). La caractéristique non-linéaire en écriture du composant est mesurée sur la figure 2.13.b. Dans les zones non-illuminées, l'état du cristal liquide reste inchangé. Dans les zones illuminées au-dessus du seuil d'éclairement (variable en fonction de la tension extérieure appliquée), la tension aux bornes du photoconducteur se retrouve aux bornes du FLC, dont les axes propres vont alors commuter localement. En raison de la structure mécanique SSFLC, le composant se révèle être bistable entre un état UP et un état DOWN, permettant une mémorisation de l'éclairement incident sans tension de maintien.

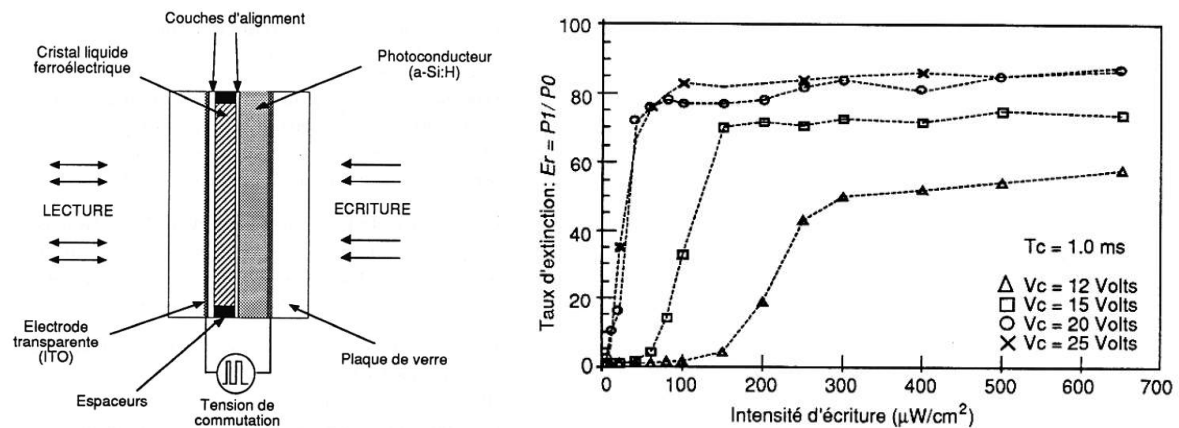


FIG. 2.13 – (a) Structure d'un MSL optiquement adressé, de type SSFLC. L'épaisseur typique de la couche de cristal liquide est de $2 \mu\text{m}$ – (b) Réseau de caractéristiques non-linéaires en écriture d'un MSLAO de type SSFLC.

A la lecture, la valve optique se comporte comme une lame demi-onde, que l'on a pu utiliser comme modulateur binaire d'intensité (entre polariseurs croisés) ou comme modulateur de phase binaire ($0, \pi$). Ce type de cellule sera à nouveau exploité au chapitre 3, dans une version électriquement adressée, pour une application d'aiguillage optique spatial entre fibres optiques.

¹⁵Indium Tin Oxide.

Nous avons quantifié expérimentalement la capacité de ce type de composant à mémoriser des images binaires de forte résolution en y enregistrant des HSO binaires. Les résultats sont publiés dans la référence [4] fournie en partie III. L'action de régénération du MSLAO est illustrée sur la figure 2.14, dans le cas d'un RIPN configuré pour une multiplication matricielle de taille 5×5 [55]. Les cinq facettes de HFM2 correspondant au nœud B_{32} sont représentées sur la figure 2.14.a. Chaque facette est un HSO d'amplitude binaire codé sur 64×64 cellules selon la méthode historique¹⁶ de Lohmann [57]. L'hologramme multifacettes global est assemblé par photo-réduction sur banc photographique. Ce travail minutieux a été réalisé avec le plus grand soin par Guy Chuiton, du département Micro-ondes de Telecom Bretagne. Les sources d'entrée sont fournies par un laser He-Ne filtré et étendu spatialement. La mémorisation de l'éclairement incident pour deux valeurs de la tension de commande du composant montre que l'on peut s'approcher de la distribution d'illumination "carrée" idéale (figure 2.14.d), dans le cas d'un plan de nœuds illuminé par trois entrées actives, dont la distribution lumineuse est indiquée sur la figure 2.14.b, avant enregistrement dans le MSLAO. La diaphonie est les non-uniformités résiduelles avant le composant sont supprimées. La fi-

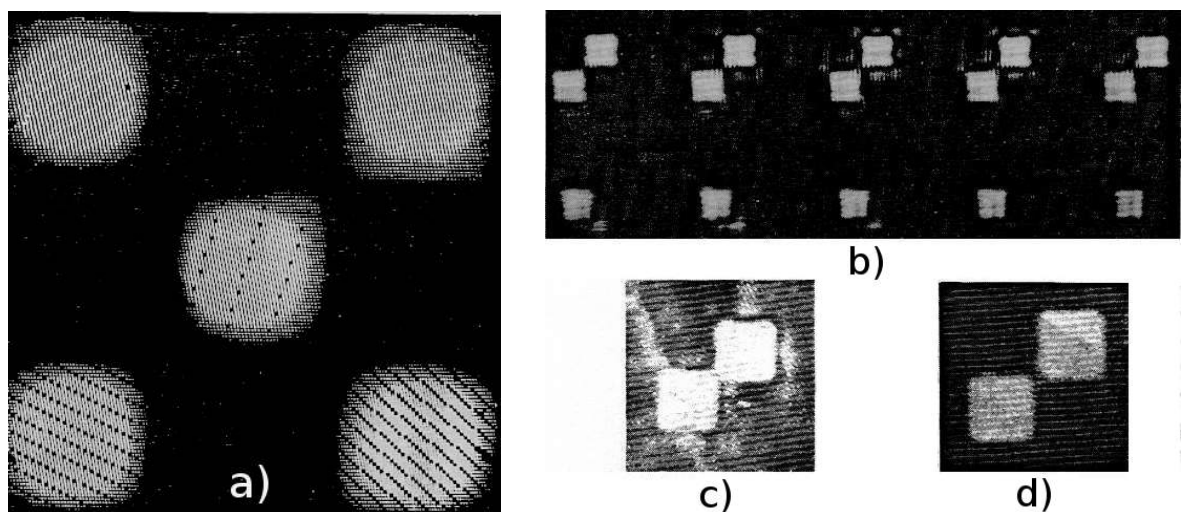


FIG. 2.14 – (a) Portion de HFM2 correspondant à un nœud configuré pour la multiplication matricielle 5×5 (HSO d'amplitude binaire) – (b) plan de nœuds avant le MSLAO – (c) et (d) distributions enregistrées dans le composant pour deux valeurs de la tension de commande V_c .

gure 2.15.a montre le schéma du montage expérimental global, incluant le bras d'écriture et de lecture de la valve optique. Les valeurs du plan d'entrée $A(t)$ sont entrées au moyen d'un MSLAE à cristal liquide nématique, comportant 7×5 pixels. Chaque facette de l'hologramme d'entrée HFM1 est un HSO de type Lohmann comportant 256×256 cellules. Les reconstructions s'effectuent dans le plan focal image de l'achromat LTF1, de focale $f = 600\text{mm}$. La figure 2.15.b fournit le plan de sortie, calculé optiquement et enregistré au moyen d'une camera CCD, correspondant à la multiplication matricielle $C = AB$ avec les

¹⁶Algorithme dit de "détour de phase", première contribution connue à l'holographie de synthèse par ordinateur.

valeurs :

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad C = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

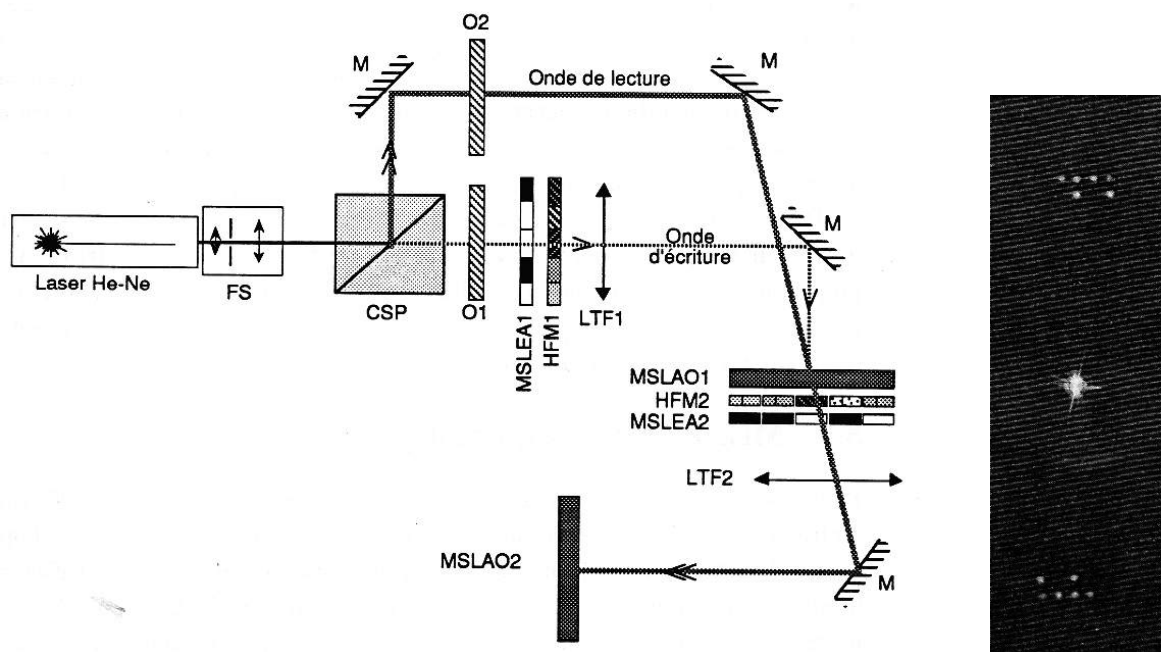


FIG. 2.15 – (a) Montage expérimental d'implantation du RIPN; CSP : cube séparateur polarisant; FS : filtre spatial; LTF : lentille de TF; O1/O2 : obturateurs; M : Miroir – (b) Calcul optique de la multiplication matricielle $C = AB$ évoquée ci-dessus (plan de sortie enregistré dans MSLAO2). Le résultat est disponible dans les deux ordres de diffraction ∓ 1 .

2.5 Conclusions et perspectives

Dans ce chapitre, nous avons essayé de tirer parti du potentiel de l'optique diffractive et de l'équivalence entre propagation et calcul pour implanter des systèmes d'interconnexions massives entre deux plans de données. Nous illustrons notre démarche par deux exemples de transformations : un réseau d'interconnexions fixes et un réseau de calcul optique mettant en jeu des interconnexions reconfigurables, spatialement non-homogènes (NIT), dont nous avons démontré la faisabilité de l'implantation optique. Une seconde phase, non exposée dans ce manuscrit et publiée dans [50], nous a permis d'améliorer les performances de l'architecture par l'utilisation d'algorithmes d'holographie numérique performants, tirant parti de la non-linéarité de la valve optique et plus généralement, de plans de remise en forme formés de matrices de photo-détecteurs. Ces derniers travaux ont été réalisés avec le concours de H. Haman, doctorant au département d'Optique.

Tirant parti de l'expérience acquise dans le domaine de l'holographie numérique et de ses applications au TOI, j'ai mené d'autres études dans la foulée des travaux présentés dans ce chapitre. La plupart ont donné lieu à publication. On peut citer :

- Etude et réalisation d'un *extracteur de contour* parallèle utilisant un filtre de gradient modifié. Ce travail a été réalisé en partenariat avec le groupe de recherche en traitement de signal de l'Ecole Navale [7]. L'holographie numérique est utilisée ici de manière originale pour calculer et coder un HSO de phase binaire opérant comme la dérivée d'une distribution de Dirac¹⁷. L'algorithme DBS¹⁸ [58] nous a permis de rejeter le bruit de quantification du filtre holographique en dehors de la zone d'extraction de contour.
- Etude du *couplage* entre *HSO fixes* et *HSO dynamiques* sur MSL à cristal liquide. Cette thématique a constitué le début des travaux de thèse de P. Berthelé, en collaboration avec H. Hamam. L'objectif principal était l'augmentation de l'efficacité de diffraction des HSO dynamiques sur cristal liquide ferroélectriques, limitée à 41% par la modulation de phase binaire. Différentes configurations ont été étudiées avec succès, notamment le couplage par illumination de Talbot et le calcul conjoint d'associations d'éléments diffractants "fixe/reconfigurable" par analogie avec la méthode de corrélation MACE¹⁹. Ce point fut l'occasion de discussions fructueuses avec Y. Pétillot, doctorant au département d'Optique.
- Etude de HSO pour l'*analyse de front d'onde*. Une collaboration fructueuse avec l'ONERA conduisit à l'étude et la réalisation d'une optique diffractante pour un interféromètre à décalage latéral à trois ondes, publiée dans [5]. Ce travail fut effectué en tandem avec mon collègue Kevin Heggarty, à une époque où nous démarrions l'installation d'une salle blanche pour la fabrication et le test de micro-optiques. Depuis cette époque foisonnante, Kevin a pris la responsabilité de cette activité et l'a fait évoluer positivement dans de nombreuses directions.

Plus généralement, les travaux présentés dans ce chapitre nous ont permis d'aborder les étapes suivantes avec une banque de concepts, d'outils et de méthodes propres au traitement optique spatial de l'information. Restait alors à développer la composante temporelle, qui constitue la clé de voute et le cœur de métier des télécommunications optiques, objet des chapitres suivants.

¹⁷agissant donc comme une dérivée, par convolution au sens des distributions.

¹⁸Direct Binary Search.

¹⁹Maximum Average Correlation Energy.

Chapitre 3. *Interconnexions et aiguillage optique entre fibres monomodes*

La commutation spatiale optique est un sujet de recherche qui a émergé dans les années 1980, avec la mise en place des liaisons à fibres monomodes. Avec le déploiement du multiplexage de longueurs d'onde (WDM¹) à partir de la décennie 90, la thématique a évolué vers le brassage de canaux optiques. L'objectif principal était ambitieux sur un plan expérimental : aiguiller spatialement des pinceaux lumineux de quelques microns de diamètre, modulés par des impulsions lumineuses ultra-courtes (qq centaines de picosecondes) en préservant scrupuleusement les caractéristiques spatiales et temporelles de ces fronts d'ondes. La tâche se compliquait en rajoutant la dimension spectrale de ces réseaux optiques colorés, dans la mesure où les longueurs d'onde d'un multiplex WDM ne sont espacées que de 0,8 nm. Pour être totalement transparente aux débits transportés, l'opération doit rester confinée au périmètre de l'optique, sans recourir à une éventuelle conversion optique-électronique.

Je me suis intéressé à ce sujet à l'issue de mes travaux sur les interconnexions optiques, présentés au chapitre 2. Les similitudes entre les deux thématiques sont évidentes si l'on considère que l'espace libre est la solution adaptée pour fournir un RI transparent et de forte capacité. Les points sensibles sont ici le caractère dynamique des connexions et leur extrême sensibilité au positionnement des entrées/sorties à fibres. De ce point de vue, les progrès réalisés en matière de modulation spatiale de la lumière et d'intégration opto-mécanique ont permis de concevoir et de réaliser des démonstrateurs performants. Nous y avons modestement contribué, à travers les thèses de Patrick Berthelé, Mustapha Razzak et Chidi Uche, et les nombreux projets soumis aux élèves-ingénieurs de Telecom Bretagne. Ce chapitre présente l'état de l'art, le cheminement et les résultats de nos travaux, qui s'échelonnent de 1996 à 2003.

¹Wavelength division multiplexing

3.1 Contexte et état de l'art

3.1.1 Réseaux WDM et transparence optique

En une vingtaine d'années, le déploiement du multiplexage de longueurs d'onde et de l'amplification optique² ont permis le déploiement des réseaux à fibre optique qui tapissent notre globe, seul canal de transmission viable pour écouler les débits gigantesques liés au trafic internet (IP) et aux communications téléphoniques mondiales. Alors que la protection et les routage de ces données sont en partie assurées au niveau des couches supérieures transportées par la couche optique (SDH³, IP⁴, Ethernet), il est très tôt apparu naturel de considérer le canal optique (i.e. la longueur d'onde) comme une entité élémentaire pour gérer le réseau de transport. Ce besoin d'une couche optique flexible est lié à l'augmentation massive du trafic IP et à l'existence de liens atteignant plusieurs centaines de Gbit/s, voire des Tbit/s par fibre sur des milliers de kilomètres. En d'autres termes, la gestion classique des ressources de transport au niveau du conteneur STM⁵ de niveau 1 (à 155 Mbit/s) de la SDH⁶ n'est plus adaptée depuis longtemps. Dans le cas général, Les équipements qui doivent manipuler ces canaux sont des brasseurs. Si il équipe nos réseaux depuis de nombreuses années dans sa version électronique (SDH), le brasseur en version optique mobilise les recherches depuis le début des années 90. Des équipements commerciaux équipés de ports optiques sont apparus au début des années 2000, mais les versions optiquement transparentes (i.e. à cœur optique) sont restées au stade prototypal. Fonctionnellement, on distingue deux types de brasseurs optiques :

- les brasseurs de *canaux* : les différents canaux WDM contenus dans les fibres sont séparés, puis chaque canal est aiguillé spatialement en fonction de sa longueur d'onde, avant recombinaison dans les fibres de sortie
- les brasseurs *échangeurs* : des composants permettant de convertir la longueur d'onde d'un canal optique sont utilisés, de sorte que chaque composante d'un peigne de longueurs d'onde peut être translatée en longueur d'onde (sans toucher au flux à haut débit modulant) lors de la traversée du brasseur.

La fonction de brassage optique reconfigurable permet à un opérateur d'offrir à la demande des services de "circuits optiques" à très haut débit. Le débit nominal d'un circuit WDM est de 10 Gbit/s ou 40 Gbit/s, avec une évolution prévue vers le 100 Gbit/s. Le brassage autorise également la restauration locale du réseau en cas de panne de liens ou de nœuds, et ce de manière transparente et potentiellement plus rapide par rapport aux couches clientes –électroniques– transportées.

Un point-clé concernant les brasseurs optiques est leur niveau de transparence optique. Elle correspond à l'aptitude du dispositif à transporter un canal optique de manière indépendante de ses caractéristiques temporelles et spatiales. En pratique, ces caractéristiques seront dégradées par passage dans les fibres, les composants optiques passifs et actifs tels que les dispositifs de régénération optique. Dans le cas le plus fréquent d'un canal optique transportant

²à fibre dopée erbium - EDFA

³Synchronous digital hierarchy

⁴Internet protocol

⁵Synchronous transfer module

⁶Synchronous Digital Hierarchy

un signal numérique, ces derniers seront classés en trois catégories, suivant la technologie de régénération utilisée :

- Régénération **1R** = réamplification optique. Seule l'amplitude du signal est régénérée (...au détriment du rapport signal-sur-bruit optique...)
- Régénération **2R** = 1R + remise en forme du signal. Ce niveau de transparence est limité au format de modulation des données.
- Régénération **3R** = 2R + re-synchronisation temporelle sur une horloge de référence, éliminant le phénomène de "gigue temporelle". La régénération est complète, mais une nouvelle limitation va apparaître concernant le débit, limitant encore un peu la transparence. La régénération classique "O-E-O"⁷ opérée dans les équipements SDH est classée dans la catégorie 3R.

Le projet RYTHME⁸, labellisé par le RNRT⁹ en 2004 [59], avait défini une notion de transparence basé sur les quatre paramètres physiques de la transmission d'un canal optique sur fibre que sont : le rapport signal-sur-bruit optique (OSNR), la dispersion modale de polarisation (PMD), la dispersion chromatique et la phase non-linéaire. La dégradation éventuelle de ces paramètres peut également être modélisée et évaluée au niveau d'un brasseur pour quantifier sa transparence. Nous exposerons notre contribution sur ce point au chapitre 5.

Par la suite, on considèrera des nœuds présentant une granularité de type canal ou bande de longueur d'onde. Conformément à la classification que nous avons établie dans le cadre du projet RYTHME [60], on distinguera deux architectures : les brasseurs (ou nœuds) à modules discrets (NMD) et les nœuds à modules intégrés (NMI).

La structure d'un NMD est schématisée sur la figure 3.1.a. L'étage de division (coupleurs ou

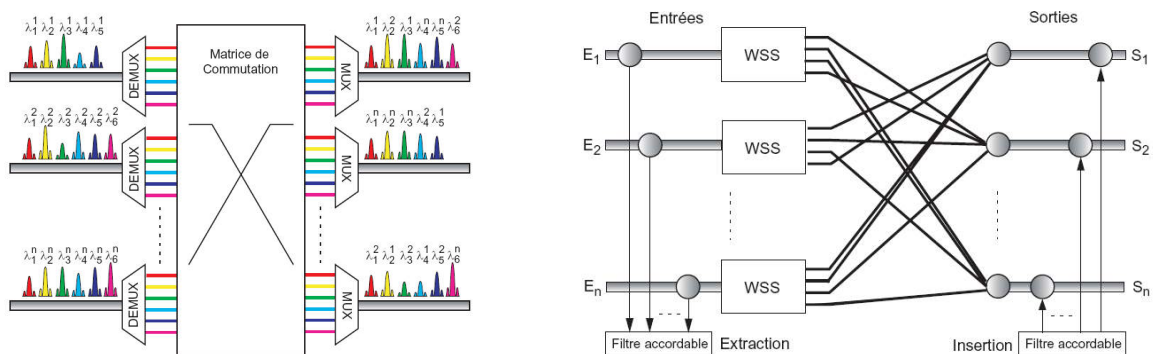


FIG. 3.1 – (a) architecture d'un brasseur optique à modules discrets (NMD) (b) architecture d'un brasseur optique à modules intégrés (NMI), utilisant des commutateurs sélectifs en longueur d'onde comme brique de base.

démultiplexeurs optiques) permet de séparer les différents canaux issus d'une même fibre. Les canaux ainsi dissociés subiront des routage indépendants dans la matrice de commutation optique avant d'être re-combinés dans les fibres de sortie. Les architectures NMI sont

⁷Optique \rightarrow Electronique \rightarrow Optique

⁸Réseaux hybrides transparents hiérarchiques multiplexés en longueur d'onde.

⁹Réseau national de recherche en télécommunications.

plus récentes. Elles utilisent comme brique de base le commutateur sélectif en longueur d'onde (WSS¹⁰) sous différentes variantes. Elles visent à une réduction de la complexité et des coûts par rapport à l'option NMD, à une diminution globale des pertes des dispositifs et une meilleure intégration des étages d'amplification optique et de compensation de la dispersion chromatique (non représentés sur la figure 3.1). Le WSS devient alors une brique de base incontournable permettant de bâtir un brasseur optique transparent de manière modulaire et progressive. Schématiquement, un WSS est un "mini-brasseur" comportant un port d'entrée et N ports de sortie. Il aiguille les canaux du multiplex WDM entrant de manière sélective vers les ports de sortie, en assurant au besoin une fonction d'égalisation des canaux optiques (figure 3.2.a). La première solution d'implantation optique d'un WSS [61] est représentée sur la figure 3.2. Elle utilise un montage optique propre au façonnage d'impulsions ultra-courtes, en plaçant un translateur de faisceau à cristal liquide (Nématique twisté) entre deux réseaux de diffraction à haute résolution spatiale.

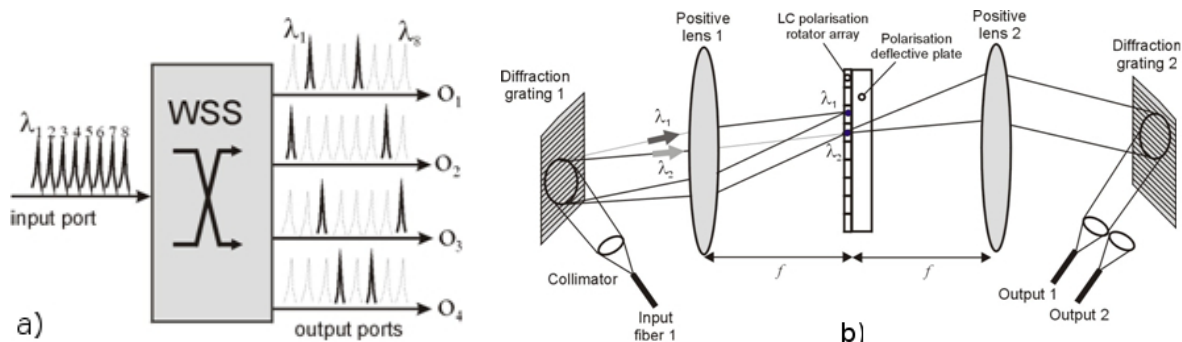


FIG. 3.2 – (a) Schéma de principe d'un WSS – (b) Implantation d'un WSS par décalage spatial dans le plan spectral.

Les canaux optiques démultiplexés par le premier réseau sont décalés (ou non) dans le plan intermédiaire et re-multiplexés dans l'une de deux fibres de sortie. Cette solution a permis d'implanter des prototypes de WSS transparents à des débits de 40 Gbit/s, fonctionnant sur 40 canaux et présentant des pertes d'insertion de 7 dB. Depuis, le concept a été amélioré et des composants commerciaux utilisant des technologies de micro-déflexion en espace libre sont disponibles.

Les activités que nous allons présenter ont suivi une voie parallèle à ce panorama. A travers les contrats et collaborations entrepris avec des équipementiers et des opérateurs du monde des télécommunications, nous avons développé et poussé le concept d'*aiguilleur optique* de bandes spectrales. Défini antérieurement au concept de WSS sur un cahier des charges édicté par un opérateur (FT), il en a présenté des fonctionnalités identiques, mais avec une granularité inférieure (bandes au lieu de canal).

¹⁰Wavelength selective switch

3.2 Principe de l'aiguilleur optique

3.2.1 Cahier des charges

L'aiguilleur optique est un dispositif de commutation $1 \times N$ qui peut être vu comme le précurseur du WSS de canaux. Le cahier des charges du dispositif avait été lancé lors du démarrage du projet CRISTO¹¹ [62], et avait évolué au cours de l'avancement des travaux. Le dispositif a en suite été repris et amélioré lors d'une étude financée par la société Opongone/Memscap.

Les spécifications initiales de l'aiguilleur optique sont les suivantes :

- *Fonction principale* : commutation spatiale d'une voie d'entrée vers une parmi N , notée $1 \times N$;
- *Fonction secondaire* : sélectivité spectrale permettant de commuter de manière sélective des bandes de canaux WDM;
- *Entrées/sorties physiques* : fibres optiques monomodes à 1550 nm (diamètre de cœur et de gaine respectifs de 10 et 125 μm), véhiculant des signaux DWDM dans la bande 1500-1600nm. Le signal optique émanant d'une fibre d'entrée est donc un peigne de longueurs d'onde modulées en amplitude par un signal binaire (le plus souvent NRZ) de débit maximal 40 Gbit/s. La plage de longueur d'onde la plus probable est la bande C, correspondant à la fenêtre spectrale s'étendant de 1530 à 1560 nm. Les sources générant les porteuses sont des lasers à semi-conducteurs DFB, de largeur spectrale typique 0,1 nm;
- *Transparence optique* : au débit et au format de modulation. Une mesure quantitative en est la *pénalité* en puissance du dispositif, définie comme la puissance supplémentaire requise pour conserver un TEB¹² de 10^{-9} au débit de 10 Gbit/s. Cette pénalité doit rester inférieure à une valeur typique de 0,2 dB, en-deça de laquelle on considérera le système comme transparent;
- *Capacité visée* : 40 fibres de sortie;
- *Temps de reconfiguration* : < 1 ms
- *Pertes d'insertion maximales* : 10 dB;
- *Sensibilité des pertes à la polarisation* : PDL¹³ inférieure à 0,5 dB;
- *Niveau de diaphonie maximal en sortie* : -35 dB;
- *Fonction de Protection optique "1+1"* (optical bridging). La connexion systématique vers deux fibres distinctes peut revêtir un rôle important pour introduire une fonction de protection automatique dans le système d'aiguillage. Comme l'indique la figure 3.3 schématisant la liaison optique entre deux nœuds 1 et 2, le signal optique arrivant au premier est véhiculé simultanément sur la voie de transmission et un chemin de protection. Si une rupture est détectée sur le chemin de transmission, l'interface de réception du nœud 2 commute vers le chemin de protection. Dans le cadre opérationnel d'un réseau de transport à fibres optiques, cette voie de transmission supplémentaire

¹¹Cristaux liquides pour fonctions de routage insérées dans les systèmes de transport optique

¹²Taux d'erreur binaire

¹³Polarisation dependant loss

fournit une protection interne de l'aiguilleur de type "1+1", disponible pour l'ensemble des ports de sortie, nous amenant à considérer un dispositif de type $1 \times 2N$ pour assurer un aiguillage protégé de type $1 \times N$.

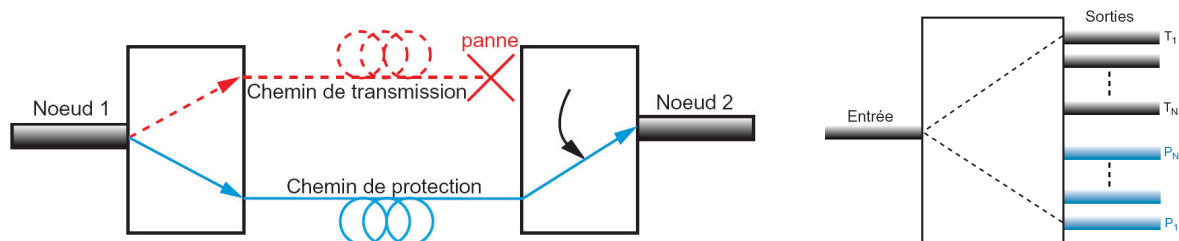


FIG. 3.3 – (a) Principe de la protection d'une liaison par une voie de protection et (b) schéma d'un aiguilleur optique $1 \times 2N$ fournissant N chemins de transmission et N chemins de protection.

- Fonctions additionnelles, non obligatoires, mais intéressantes d'un point de vue opérationnel :
 - *diffusion* multi-voies (multicast) : possibilité de diffuser le signal d'entrée vers plusieurs fibres de sortie;
 - *supervision* : fourniture d'une voie de monitoring permettant de suivre l'état d'un canal optique et/ou celui de l'aiguilleur;
 - *atténuation* optique variable : possibilité d'imposer aux canaux aiguillés un affaiblissement programmable, dans le but d'égaliser en puissance les voies du spectre WDM.

3.2.2 Interconnexions $1 \times N$ de fibre à fibre

Nous considérons un système optique en espace libre assurant la fonction d'interconnexion d'une fibre d'entrée vers une fibre parmi N fibres de sortie. La structure de base est un montage afocal ($4f$), réunissant 2 objectifs convergents identiques partageant un foyer et axe optique (figure 3.4.a). Ce montage d'imagerie a déjà été exploité au chapitre 4. Conserver également la phase et la courbure, il peut être utilisé pour coupler l'information émanant d'une fibre monomode vers une autre, avec un minimum de pertes. Il suffit alors de positionner des fibres de même caractéristiques dans les plans d'entrée et de sortie du montage. Une déflexion de faisceau d'un angle θ intervenant dans le plan intermédiaire (de Fourier) aura pour effet de décaler l'image de la fibre d'entrée dans le plan de sortie d'une quantité $x = f \tan(\theta)$ (figure 3.4.a). La société DICON FIBEROPTICS commercialise depuis les années 90 un commutateur optique fonctionnant sur ce principe, en intégrant des micro-prismes à facettes mus par des moteurs pas-à-pas. Le schéma 3.4.a peut être replié sur lui-même, par utilisation d'un miroir déformable dans le plan de Fourier [63]. On rappelle que la connexion est invariante par translation (IT) dans la mesure où une translation \vec{v} de l'objet émetteur dans le plan d'entrée se traduira par un décalage $-\vec{v}$ dans la plan image. Si l'on veut généraliser à des interconnexions de N vers N fibres indépendantes –donc à un réseau d'interconnexions NIT vis-à-vis du plan d'entrée– on utilisera l'architecture à deux plans de la figure 3.4.b, fréquemment utilisée pour réaliser des matrices de commutation spatiale [64, 65]. Outre les opérations de collimation et de focalisation réalisés par des matrices de micro-lentilles, deux

déflexions sont ici nécessaires : la première établit une correspondance spatiale entre une entrée et la sortie associée et le second remet le faisceau sur l'axe pour une réinjection optimale dans la fibre de sortie. Les deux angles de déflexion sont symétriques. La performance du

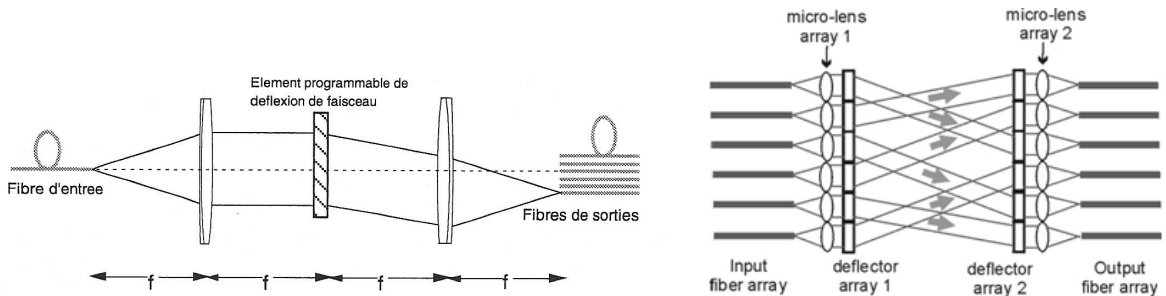


FIG. 3.4 – (a) Interconnexions de $1 \times N$ fibres par montage $4f$ – (b) Interconnexions $N \times N$ à double étage de déflexion

ystème d'interconnexions sera évaluée par l'efficacité de couplage dans les fibres de sortie, dépendant de quatre paramètres :

1. l'*alignement* relatif de la fibre d'entrée et de son image par rapport à la fibre de sortie, dont la figure 3.5 résume les principaux écarts. L'estimation des pertes induites repose sur une approximation du mode LP₀₁ de la fibre par un mode Gaussien et le calcul de l'intégrale de recouvrement avec le cœur de la fibre de sortie. Dans le cas de fibres monomodes à $\lambda = 1,55\mu\text{m}$ (rayon de mode $\omega_0 = 5\mu\text{m}$), les valeurs des 4 paramètres provoquant une perte de couplage de 1 dB (soit 20% de pertes linéaires) sont les suivantes : $\delta z = 77\mu\text{m}$, $\delta\theta = 2,7^\circ$, $\delta x = 2,5\mu\text{m}$ et $\omega/\omega_0 = 0,6$ ou $1,6$. Le paramètre le plus sensible est donc ici le désalignement transversal δx de la figure 3.5.c.

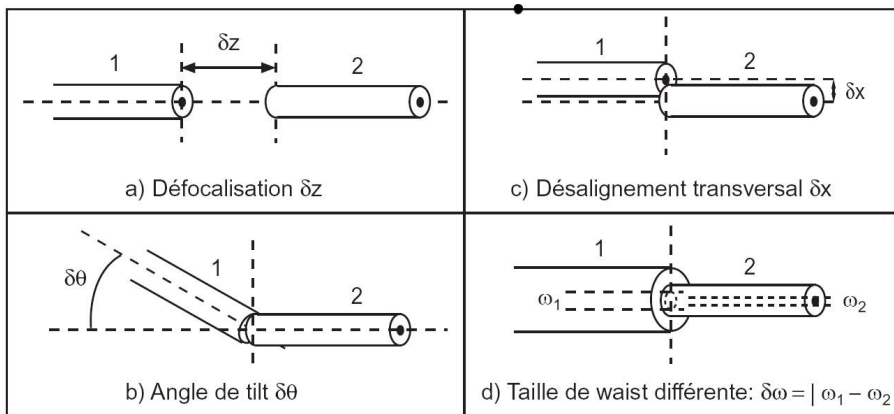


FIG. 3.5 – Origines géométriques des pertes de couplage de fibre à fibre.

2. l'*ouverture numérique* ON_o des optiques, qui doit être adaptée à celle des fibres optiques monomodes ($ON_f = 0,11$) pour minimiser le vignettage et les aberrations. Sur le système considéré, le vignettage du faisceau Gaussien par une lentille de rayon r

peut s'exprimer [63] en fonction du rapport $R = r/w$ par le rendement en puissance :

$$\eta_v = \left(1 - e^{-2R^2}\right)^2 \quad (3.1)$$

où w est la taille du col du faisceau au niveau des lentilles. On montre ainsi que plus de 98% de l'énergie est couplée dans la fibre de sortie pour $R \geq 1,5$. En notant que R est aussi égal au rapport ON_o/ON_f , on en déduit la valeur minimale $ON_o = 0,17$. Les aberrations sphériques vont poser une borne supérieure au paramètre, étant proportionnelles à la puissance quatrième de ON_o . Pour la minimiser, diminuer la distance focale signifierait limiter le nombre de fibres adressables dans le plan de sortie. L'aberration chromatique sera négligée, du fait de la très faible largeur de bande considérée (moins de 35 nm sur la bande C du multiplex WDM). Le choix de l'ouverture de l'objectif se fera donc dans une plage immédiatement supérieure à 0,17. Le système optique a été modélisé au cours du travail de thèse de C. Letort à l'aide du logiciel ZEMAX en testant plusieurs types d'optiques, parmi lesquelles une lentille plano-convexe¹⁴ et un doublet achromatique¹⁵. Pour chaque cas, le diagramme "d'impacts" (spot-diagram) a été tracé par lancer de rayons et comparé au disque d'Airy marquant les limites de la diffraction. La source simulée est composée de plusieurs foyers d'ondes monomodes gaussiens $\omega_0 = 5\mu\text{m}$ aux longueurs d'onde $\lambda_i = 1530 + i \cdot 10 \text{ nm}$ ($0 \leq i \leq 3$) du spectre WDM. L'avantage du doublet est évident sur la figure 3.6, montrant que la majorité des rayons se focalisent à l'intérieur de la tâche d'Airy. Ce type d'optique sera donc systématiquement utilisé par la suite.

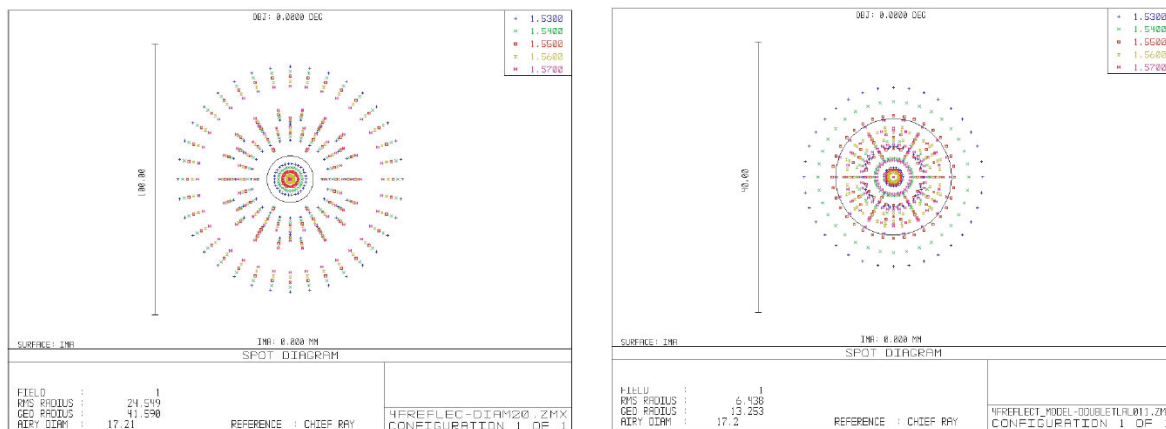


FIG. 3.6 – (a) Diagramme d'impacts pour une lentille plano-convexe et (b) pour une doublet achromatique pour 5 longueurs d'onde du spectre WDM (d'après [66])

3. les pertes de Fresnel. En considérant (i) les extrémités fibres, (ii) les objectifs et (iii) le déflecteur on dénombre 8 interfaces air-verre dans le montage, soit un taux de transmission de fibre à fibre de $T = 0,96^8 = 0,72$ (1,4 dB de pertes). On utilisera donc –si possible– des interfaces traitées anti-reflet à la longueur d'onde de $1,55 \mu\text{m}$.

¹⁴JML optical, REF CPX10132, $f = 37,8\text{mm}$, $D = 16\text{mm}$, O.N. = 0,21

¹⁵Melles Griot, REF LAL011, $f = 40\text{mm}$, $D = 15\text{mm}$, O.N. = 0,18

4. la *transparence* du défecteur. Ce terme est intimement à la technologie de déflexion utilisée et, dans le contexte de l'interconnexion entre fibres monomodes, il traduit à la fois le rendement énergétique du composant, la qualité optique des surfaces constitutives (déterminante pour conserver les caractéristiques du mode Gaussien propagé) et le schéma d'adressage temporel du matériau modulant. Nous reviendrons sur ce point dans le cas des défecteurs à cristal liquide.

Lors de sa thèse, P. Berthelé a réalisé un montage de caractérisation d'interconnexion de fibre à fibre en utilisant une barrette de 32 fibres en sortie [67]. Les fibres monomodes sont maintenues entre deux réseaux de micro-sillons en forme de "V" gravés sur des plaquettes de silicium, espacés de $250 \mu\text{m} \mp 0,5 \mu\text{m}$ de cœur à cœur. Le système d'interconnexions expérimental en transmission est représenté sur la figure 3.7. Le porte-fibres est aligné sur un nano-positionneur à 6 axes comportant des actionneurs piezo-électriques. Les objectifs sont des doublets achromatiques de focale 25 mm et de diamètre 10 mm ($\text{ON}_o = 0,2$). Les pertes d'insertion de moyennes de fibre à fibres mesurées à 1550 nm sont de 2 dB. On passe d'une connexion à une autre en translatant la positionneur suivant l'axe des fibres. A ce stade, on a réalisé une interconnexion multiple (ou diffusion) vers 5 fibres simultanément en utilisant un réseau holographique de phase binaire dit "de Damman"¹⁶ [42] positionné dans le plan de Fourier. Le composant est calculé de manière à diffracter une puissance uniforme sur ses 5 ordres centraux (0, ± 1 , ± 2), puis réalisé au laboratoire de fabrication de micro-optique du GOSC par dépôt et gravure de photorésine sur plaque de verre. On mesure une

n° ordre de diffraction	-3	-2	-1	0	1	2	3	total
% puissance diffractée mesurée	1,1	15,8	14,9	11,0	15,8	15,8	1,2	73,3
n° fibre de sortie	11	12	13	14	15	16	17	total
% puissance couplée mesurée	0,2	4,4	5,5	4,1	6,1	5,1	0,2	25,2

TAB. 3.1 – Connexions multiples à l'aide d'un réseau de Damman 1×5 . Les mesures des puissances diffractées montrent une bonne uniformité et une bonne isolation (chute de puissance des ordres ∓ 3

efficacité de diffraction de 73% sur les 5 ordres centraux (tableau 3.1). Compte-tenu du taux de couplage de fibre à fibre mesuré précédemment (62%), de l'effet de vignettage dû à la taille limite du réseau ($7 \times 7\text{mm}$, induisant un taux de transmission de 0,9) et du coefficient de transmission de la plaque support du réseau (80% à 1550 nm), on peut prédire un taux de transmission cumulé sur les 5 fibres d'environ 32%. La valeur expérimentale mesurée est de 25% (détails dans le tableau 3.1), résultat satisfaisant si l'on prend en compte les erreurs de positionnement des fibres (dans les deux dimensions) et les défauts de photolithographie du réseau de Damman.

3.3 Déflexion de faisceau rapide à cristal liquide ferroélectrique

3.3.1 Déflexion de faisceau digitale

De manière générale, un module de déflexion optique permet de dévier un faisceau défini par une direction incidente (angle α) en une direction émergente (angle β). Si l'on repère

¹⁶appartenant à la classe des illuminateurs de tableaux

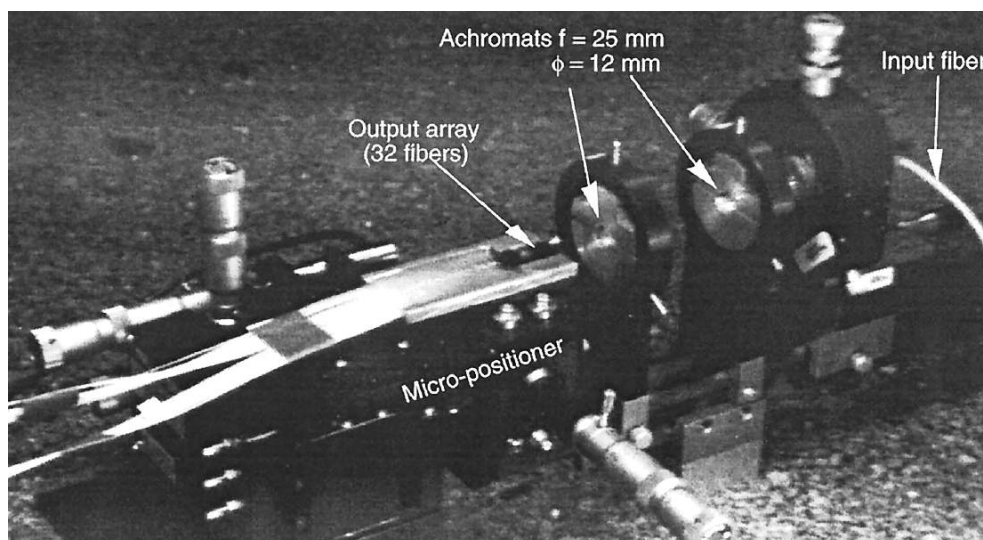


FIG. 3.7 – Système d'interconnexions de 1×32 fibres optiques monomodes.

les angles par rapport à la normale au défecteur, l'angle de déflexion sera défini par $\theta = \alpha - \beta$. Schématisée sur la figure 3.8, l'opération de déflexion en espace libre peut être obtenue par *réfraction* à l'interface entre deux milieux diélectriques (dioptré, prisme, lentille), par *réflexion* à l'aide d'un miroir ou encore par *diffraction* par un réseau périodique (ou, plus généralement, un hologramme). La reconfiguration de l'angle de déflexion se fera le plus souvent par une commande électrique des paramètres physiques du défecteur : indice, biréfringence, orientation, position. Sa mise en œuvre dépendra du mode de déflexion et du matériau utilisé. Seule une topologie de déflexion bi-dimensionnelle –illustrée fig.3.8.e et fig.3.8.f– n'a d'intérêt pour les interconnexions optiques en espace libre, permettant de tirer parti de la très forte capacité disponible. Cinq paramètres fonctionnels permettent de décrire quantitativement l'opération de déflexion de faisceau: (i) le *rendement* énergétique, (ii) la *plage* de déflexion, (iii) la *vitesse* de reconfiguration, (iv) la *précision* angulaire et (v) la *répétabilité* angulaire. Les deux derniers sont fortement influencés par le système de supervision du défecteur, qui devra –dans le contexte d'un système d'interconnexions entre fibres monomodes– contrôler et compenser des déformations thermiques et mécaniques de la structure à l'échelle micrométrique. De ce point de vue, la déflexion de faisceau par élément diffractant dynamique fournit résolution, répétabilité, et l'utilisation de micro-modulateurs spatiaux de lumière à cristal liquide est une solution réellement bi-dimensionnelle et directement compatible avec les algorithmes d'holographie synthétique [68, 16]. Nous revenons sur ce point en détail.

De manière générale, un composant diffractant 2D présentant une modulation spatiale périodique de périodes (P_x, P_y) va dévier une onde plane de longueur d'onde λ sous incidence α_i dans les directions β_i^k (par rapport à la normale au réseau) selon la loi dite "des réseaux" (minces) :

$$P_i(\sin \alpha_i + \sin \beta_i^k) = k\lambda \quad , i = (x, y) \quad (3.2)$$

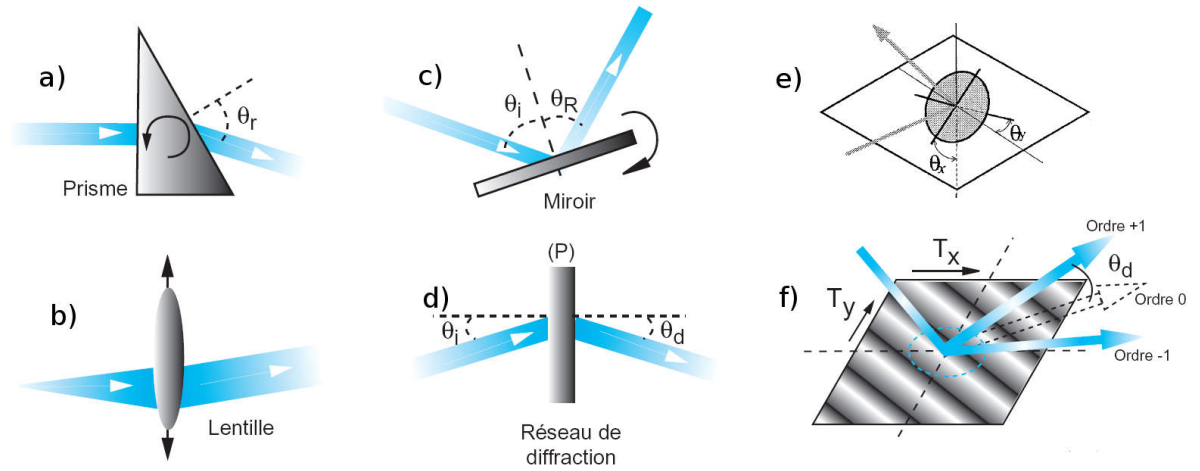


FIG. 3.8 – Principaux modes de déflexion en espace libre.

où k est l'ordre de diffraction. Contrairement au miroir, l'angle de déflexion devient dépendant de la longueur d'onde de la lumière incidente et, dans certaines configurations, de sa polarisation. La répartition de l'énergie entre les ordres de diffraction va dépendre du profil spatial d'une période élémentaire (P_x, P_y). Un déflecteur diffractant "idéal" (sans pertes) reproduisant le comportement d'un prisme ou d'un miroir mobile sans pertes défléchira toute la lumière dans un ordre unique k_0 . La modulation induite par le déflecteur sera alors un profil spatial de phase pure défini par $\phi_{k_0}(x, y) = \exp 2ik_0\pi(x\nu_x + y\nu_y)$, où les périodes spatiales $P_x = 1/\nu_x$ et $P_y = 1/\nu_y$ sont liées aux angles de déflexion dans les deux dimensions par la relation 3.2 Le cas $k_0 = 1$ (ordre 1) est le plus couramment utilisé et présente deux avantages : plus faibles déphasages à produire et plus faible sensibilité chromatique.

L'affichage des réseaux de phase bidimensionnels sur modulateurs spatiaux pixellisés ne pourra se faire qu'au prix d'un échantillonnage spatial sur la grille de pixels du modulateur spatial, et d'une quantification de la phase spatiale sur N niveaux $\{\exp(i\phi_1), \exp(i\phi_2) \dots \exp(i\phi_N)\}$, avec $\phi_k = 2k\pi/N$. La figure 3.9 illustre cette double quantification pour $N = 2$ et $N = 4$. Le rendement de déflexion R_d d'un déflecteur à réseau est majoré par l'efficacité de diffraction théorique η du réseau de déflexion affiché. Il est défini comme le rapport de la puissance incidente P_i et de la puissance diffractée dans l'ordre 1. Ce paramètre dépend de la structure géométrique de modulation (forme du pixel et de la zone interpixel), et de la qualité de la modulation (absorption/diffusion du matériau modulant, contrôle de la modulation de phase, qualité optique des interfaces). Nous avons longuement étudié ce point dans le cas des MSL bidimensionnels à FLC. Une synthèse en sera fournie au chapitre suivant. Pour fournir un ordre de grandeur, on peut citer l'efficacité de diffraction théorique $\eta(N)$ d'un réseau mono-dimensionnel à N niveaux de phase, donnée¹⁷ par $\eta(N) = \text{sinc}^2(1/N)$ [69]. Numériquement, $\eta(2) = 0,41$ et $\eta(8) = 0,95$.

¹⁷avec $\text{sinc}(x) = \sin(\pi x)/(\pi x)$

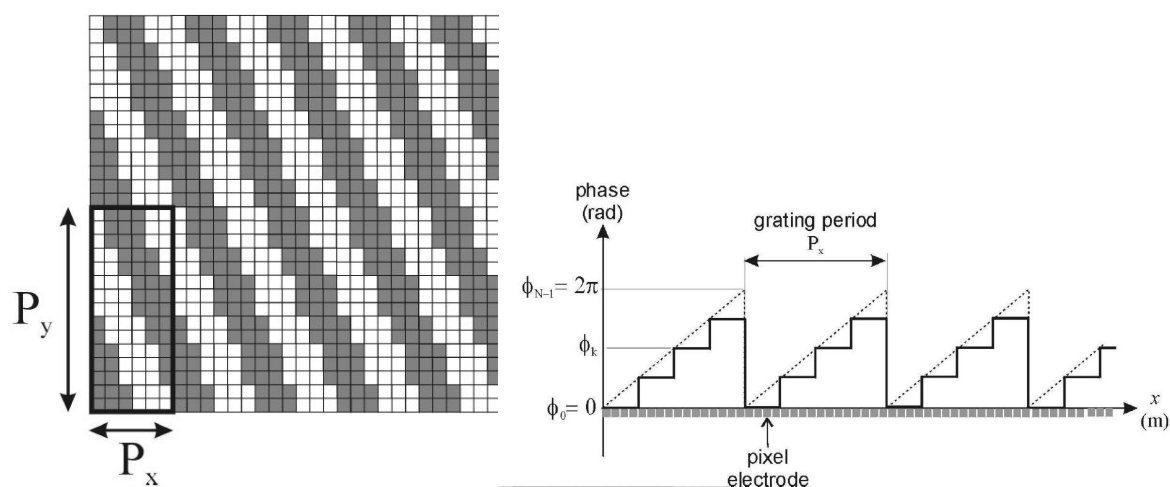


FIG. 3.9 – (a) Grille de modulation spatiale d'un réseau binaire affichée sur un SLM comportant des pixels – (b) quantification des niveaux de phase d'un réseau blazé sur quatre niveaux.

La quantification spatiale des réseaux de diffraction¹⁸ entraîne une définition des réseaux sur un nombre fini de pixels (fig. 3.9.a). Loin d'être une limitation, cette contrainte présente des avantages en termes de précision et de répétabilité des angles de déflexion. Nous avons ainsi établi un modèle dit de "déflexion digitale" [16] dont les caractéristiques principales sont les suivantes, dans le cas de l'approximation des faibles angles de diffraction :

- *Angle de déflexion maximal* : atteint pour une valeur minimale de la période spatiale définie par un nombre de pixels par période $N = 2$ soit $\beta_{\max} = \lambda/2p$, soit ∓ 60 mrad avec le type de modulateur que nous utiliserons par la suite ($p = 13\mu\text{m}$ et $\lambda = 1,55\mu\text{m}$).
- *Angle de déflexion minimal* : atteint pour la plus grande période spatiale affichable sur le modulateur, et dépend donc de la définition de ce dernier. Les modulateurs utilisés disposent en moyenne de $N_{\text{tot}} = 1000$ pixels par dimension, et deux périodes au minimum doivent être affichées pour que la notion de période spatiale ait un sens physique, ce qui revient à considérer un nombre de pixels par période de $N_{\text{tot}}/2$. L'angle de déflexion minimum sera donc de l'ordre $\beta_{\min} = \lambda/500p = \mp 240\mu\text{rad}$.
- *Résolution angulaire* : définie par $\delta\beta/\delta P = \beta/N$. Elle est d'autant plus importante que l'angle de déflexion est faible. En reprenant les chiffres précédents, la résolution angulaire maximale est de 480 nrad, valeur comparable à celle des défecteurs à miroirs les plus performants.

Afin d'augmenter la résolution angulaire du défecteur, nous avons introduit la notion de "quasi-période" [16], consistant à perturber localement le nombre de pixels par période du réseau, afin d'obtenir des variations de période "moyenne" inférieures à la taille du pixel. On montre facilement que le gain en résolution angulaire est donné par un facteur de quasi-période S , compris en pratique entre 10 et 100. Le prix à payer est une baisse modérée de l'efficacité de diffraction (quelques %). Ce point sera justifié au chapitre 4, où nous utili-

¹⁸abusivement notée "pixellisation"

serons cette fonctionnalité pour compenser les erreurs de positionnement des fibres monomodes induites dans la fabrication des porte-fibres.

3.3.2 Déflexion 2D et niveau d'intégration

Dans le cadre d'un dispositif d'aiguillage entre fibres optiques monomodes, le *niveau* d'intégration opto-électronique est un critère déterminant, ce qui signifie en pratique une conception compatible avec les technologies d'intégration de circuits VLSI¹⁹ pour gérer les flux de données importants entre le déflecteur et le circuit de commande.

Seules deux techniques de déflexion 3D sont compatibles avec une intégration VLSI : les micro-systèmes électromécaniques optique (MOEMS²⁰) à micro-miroirs [70] et les micro modulateurs spatiaux à cristal liquide, pour lesquels l'adressage sur circuit intégré sur silicium (LCOS) [71, 72] représente le plus forte densité d'intégration. Alors que les premiers

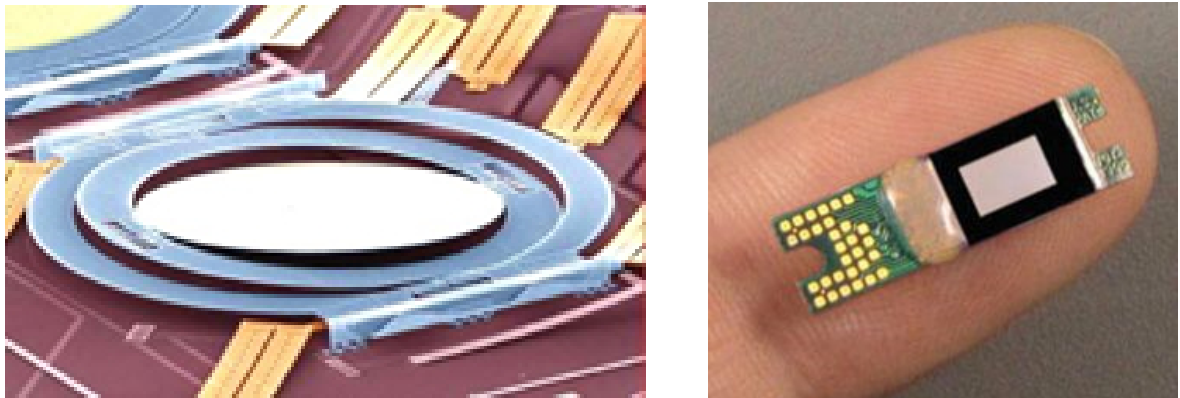


FIG. 3.10 – (a) MOEMS 3D (Lucent) et (b) LCOS (d'origine Syndiant). Le diamètre du miroir de gauche est de $300\mu\text{m}$ et la définition du modulateur de droite est de 868×480 pixels.

opèrent par réflexion sur un miroir plan, les seconds (figure 3.10b) défléchissent la lumière par affichage d'un réseau de diffraction dynamique, ou, plus généralement d'un hologramme digital reconfigurable (HDR). Par construction, le modulateur LCOS fonctionne également en réflexion (voir section 3.3.5, page 53). Les deux technologies ont leurs avantages respectifs. Les MOEMS présentent un fort rendement énergétique, de surcroît indépendant de la polarisation de la lumière incidente. Les composants MOEMS dits "3D" actionnent des micro-miroirs selon deux angles θ_x et θ_y . La plupart des solutions utilisent une structure à monture de type "cardan" (figure 3.10.a) actionnée par voie électrostatique [73], magnétique [74] ou thermique [75]. Les plages angulaires accessibles sont de quelques centaines de mrad, pour une résolution inférieure au μrad , une stabilité et une répétabilité de l'ordre de la dizaine de μrad . Ainsi, établir des connexions au sein d'une matrice de commutation $N \times N$ –selon le schéma de la fig. 3.4– à base de MOEMS-3D se fait en deux étapes : (i) des cartes de connexions anglaises "pré-calculées" et stockées en mémoire sont chargées et (ii) une procédure de correction dynamique est lancée pour minimiser les pertes d'insertion.

¹⁹Very Large Scale Integration

²⁰Micro Opto-Electro-Mechanical Systems

En fonction de la capacité de la matrice, donc du nombre de valeurs angulaires initiales à corriger (i.e. $4N$), la deuxième étape peut prendre quelques centaines de millisecondes. Le dernier point concerne la nature figée de la modulation de la lumière opérée par un MOEMS, imposant un angle de déflexion unique (à un instant donné) sans possibilité de corriger au passage le front d'onde incident.

D'un point de vue fonctionnel, le défecteur LCOS fonctionnera sans partie mobile et présentera de ce fait une parfaite stabilité mécanique et une reproductibilité totale des angles de déflexions. En outre, ils peut être configuré pour une grande variété de topologies de déflexion, grâce à la forte bande-passante spatiale bidimensionnelle du composant. Ce dernier n'est alors plus simplement utilisé pour la déflexion de faisceau, mais peut également réaliser des corrections ou des divisions de front d'onde (multi-déflexion). Ce point représente un avantage décisif sur les MOEMS en termes de flexibilité. Nous présenterons au chapitre 4 les étapes d'intégration d'un aiguilleur 2D intégrant un LCOS optimisé pour la déflexion transparente de signaux WDM.

3.3.3 Cristaux liquides et cellule SSFLC

Observés dès la fin du XIX^e siècle, les premières recherches sur les cristaux liquides restèrent confinées dans le cercle de la chimie, jusqu'aux années 60 et leur diffusion dans le monde de l'affichage grâce à leurs propriétés électro-optiques. Au niveau microscopique, les cristaux liquides sont des molécules organiques complexes schématisées par des bâtonnets longilignes à l'échelle nanométrique. Selon la température, ils présentent plusieurs phases intermédiaires (mésophases) d'arrangements moléculaires, différenciées par un ordre de position et un ordre d'orientation. D'un point de vue macroscopique, un cristal liquide est vu comme un milieu biréfringent uniaxe dont l'axe optique est orienté selon le vecteur directeur \vec{n} des molécules. Les phases les plus utilisées pour la modulation spatiale sont la phase *nématique*, la moins ordonnée, où les molécules ont simplement tendance à s'aligner parallèlement les unes aux autres, et la phase *smectique*, dans laquelle les molécules sont alignées parallèlement les unes aux autres tout en étant regroupées en couches parallèles, dites "smectiques". On distinguera la phase smectique A dans laquelle le vecteur directeur des molécules est normal aux plans des couches smectiques et la phase smectique C où le directeur forme un angle θ (dit angle de tilt) avec la normale aux plans des couches smectiques. A titre d'exemple, le cristal liquide Merck SCE13 que nous avons utilisé pour la fabrication de modulateurs dans [67] présente les transitions de phase suivantes : phase isotrope pour $T > 100,8^\circ$, puis passage en phase nématique pour $86,3^\circ < T < 100,8^\circ$, existence de la phase smectique A de $60,8^\circ$ à $86,3^\circ$ et enfin stabilisation en smectique C pour $T < 60,8^\circ$.

L'introduction d'un centre chiral –le plus souvent un atome de carbone asymétrique– modifie la répartition de charges électriques dans la molécule de CL. Dans la cas nématique, on obtient la mésophase cholestérique (N*) : les molécules gardent un ordre d'orientation dans des plans parallèles, mais le directeur \vec{n} subit une rotation d'un plan à l'autre, générant une structure hélicoïdale (figure 3.11.a). Pour la phase Smectique C chirale (SmC*), le directeur \vec{n} décrit un mouvement de précession autour d'un cône d'angle au sommet 2θ (figure 3.11.b). Depuis les travaux de Meyer [76], on sait que la phase SmC* est ferroélectrique, i.e. possède une polarisation électrique spontanée susceptible d'interagir fortement avec un champ électrique extérieur. Mais, du fait de la structure hélicoïdale, la polarisation décrit une hélice de

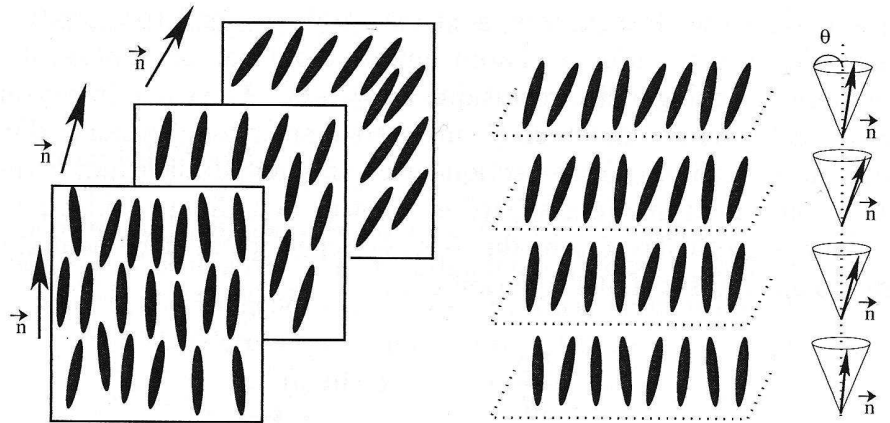


FIG. 3.11 – (a) représentation de la phase cholestérique N^* – (b) schéma de la phase smectique C^*

grand pas, on parle dans ce cas de structure héliélectrique plutôt que ferroélectrique, dont la polarisation est nulle au niveau macroscopique. Clark et Lagerwall mettent au point en 1980 un dispositif dit "Stabilisé par la Surface" (SSFLC) [56] consistant à placer le cristal liquide entre deux plaques de verre espacées d'une distance inférieure à la période de l'hélice (1 à $3\mu\text{m}$). La contrainte exercée sur le cristal liquide provoque l'écrasement du cône smectique, ne permettant que deux orientations possibles du vecteur de polarisation d'angle $\mp\theta$ avec la normale aux couches smectiques. Dans la cellule standard (figure 3.12), le CL est placé entre deux plaques de verre, recouvertes d'un dépôt conducteur transparent (ITO) ainsi que d'une couche d'alignement auxquelles les molécules de CL viennent d'ancrer, imposant une orientation des molécules qui tend à se diffuser mécaniquement dans toute la cellule. Le passage d'une position à l'autre est imposé en appliquant un champ extérieur \vec{E} à la cellule via les électrodes d'ITO, générant un couplage avec la polarisation électrique spontanée \vec{P}_s . Le temps de basculement du cristal liquide d'un état à l'autre est donné par $\tau = \eta / \vec{P}_s \cdot \vec{E}$, et fournit une mesure du temps de reconfiguration du composant²¹. On peut ainsi espérer des valeurs de τ inférieures à $100\ \mu\text{s}$ pour des champs électriques de l'ordre de $20\ \text{V}/\mu\text{m}$ [77].

3.3.4 Modulation spatiale et réseau de biréfringence diffractant

Un modulateur spatial de lumière est constitué d'une barrette ou d'une matrice de cellules indépendantes, que l'on va adresser électriquement pour afficher une carte de modulation de la lumière, par l'intermédiaire d'une modulation spatiale de biréfringence du matériau. Dans le cas de la cellule SSFLC, il s'agit d'une modulation binaire des axes de biréfringence. Outre les temps de basculement rapides, le principal intérêt de ce dispositif est qu'il conduit à une modulation de phase, certes binaire, mais indépendante de la polarisation de l'onde incidente [78]. Cette propriété est déterminante si le composant est utilisé pour la transmission sur fibre optique, sujette à de la dispersion modale de polarisation (PMD). En considérant le schéma de la figure 3.13.a, représentant deux pixels adressés par deux tensions opposées kV ($k = \mp 1$), la matrice de Jones de la cellule relative à la base de polarisations de référence

²¹ η désigne ici la viscosité du matériau

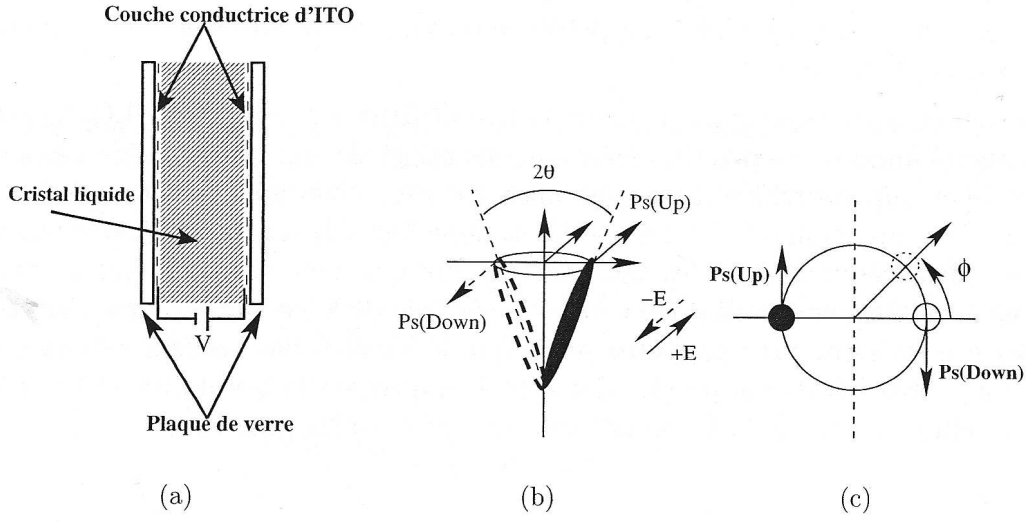


FIG. 3.12 – (a) Vue en coupe du dispositif SSFLC [56] – (b) effet du champ électrique externe appliqué à une molécule de cristal liquide.

(\vec{e}_1, \vec{e}_2) est donnée par :

$$J(k, \varphi, \theta) = \begin{pmatrix} A_1 & A_2 \\ A_2 & A_1^* \end{pmatrix} \quad \text{avec} \quad \begin{cases} A_1 = \cos^2(\theta) \exp\left(-i\frac{\varphi}{2}\right) + \sin^2(\theta) \exp\left(i\frac{\varphi}{2}\right) \\ A_2 = ik \sin(2\theta) \sin\left(\frac{\varphi}{2}\right) \end{cases} \quad (3.3)$$

où $\varphi = 2\pi nd/\lambda$ est la biréfringence de la cellule et θ l'angle de tilt du CL. Dans le cas où $\varphi = \pi$ et $\theta = \pi/4$ (configuration de lame $\frac{1}{2}$ -onde), une polarisation incidente représentée par le vecteur de Jones $\mathbf{P}_e = a\vec{e}_1 + b\vec{e}_2$ générera deux états de sortie $\mathbf{P}_s^k = ik(b\vec{e}_1 + a\vec{e}_2)$ représentant le même état de polarisation, mais avec un déphasage de π entre les deux vibrations. On obtient ainsi un modulateur de phase pure quelle que soit la polarisation incidente. Plus généralement, lorsqu'on affiche un réseau de biréfringence périodique $\mathbf{R}(x)$ de taux de compression α (figure 3.13.b), le spectre de diffraction dans le plan de Fourier se calcule par superposition et l'on aboutit [79] à l'expression :

$$\hat{\mathbf{R}}(\nu) = \underbrace{[\alpha \mathbf{P}_s^+ + (1 - \alpha) \mathbf{P}_s^-]}_{\mathbf{P}_0} \delta(\nu) + \sum_{n \neq 0} \underbrace{c_n (\mathbf{P}_s^+ - \mathbf{P}_s^-)}_{\mathbf{P}_n} \delta\left(\nu - \frac{n}{T}\right) \quad (3.4)$$

où $c_n = \sin(\pi n \alpha) / (\pi n)$ pour $n \neq 0$ et δ représente la distribution de Dirac. Deux ordres de diffraction retiennent l'attention à ce niveau : l'ordre 0, décrit par l'état \mathbf{P}_0 dans 3.4, que l'on cherchera à éliminer, et l'ordre 1 (décrit par \mathbf{P}_1), qui constitue l'ordre utile de déflexion et dont on maximisera la puissance avec un réseau équilibré, i.e. $\alpha = 0,5$, conduisant à :

$$\mathbf{P}_0 = \frac{1}{2}(\mathbf{P}_s^+ + \mathbf{P}_s^-) \quad \text{et} \quad \mathbf{P}_1 = \frac{1}{\pi}(\mathbf{P}_s^+ - \mathbf{P}_s^-) \quad (3.5)$$

Le cas $\alpha = 0,5$ sera en pratique difficile à réaliser, du fait de la présence d'un espace non-adressé entre deux pixels consécutifs (interpixel). Le calcul des rendements de déflexions

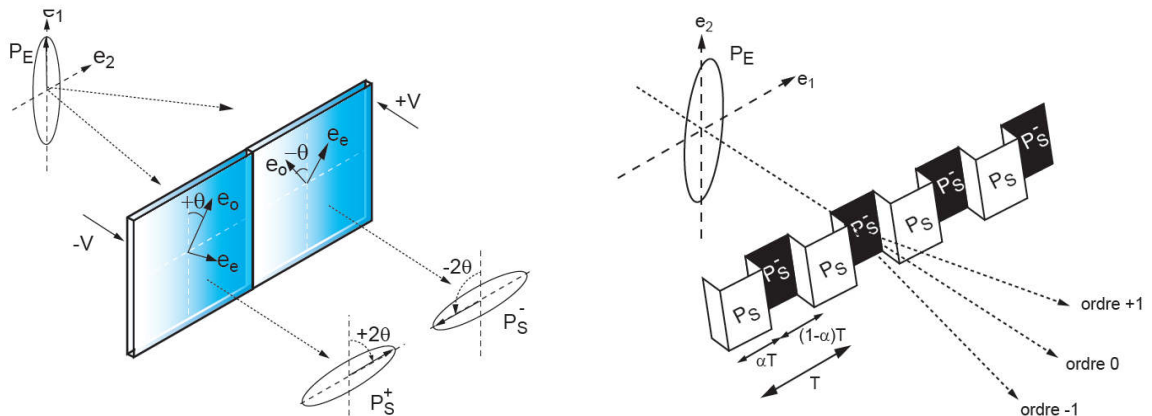


FIG. 3.13 – (gauche) Modulation d'axes de biréfringence entre deux pixels voisins et (droite) réseau de biréfringence créée par une variation périodique de la carte des tensions adressant les pixels du modulateur.

dans l'ordre 0 et dans l'ordre 1 se fait à partir des relations 3.3 et 3.5, et l'on aboutit à :

$$\begin{cases} \eta_0 = \cos^2(2\theta) + \frac{1}{2} \sin^2 2\theta (1 + \cos \varphi) \\ \eta_1 = \frac{4}{\pi^2} \sin^2(2\theta) \sin^2\left(\frac{\varphi}{2}\right) \end{cases} \quad (3.6)$$

L'efficacité de diffraction sera donc maximale pour $\eta_1 = \frac{4}{\pi^2}$, dans le cas où $\theta = \frac{\pi}{4}$ et $\varphi = \pi$ (réseau de phase binaire). Les paramètres fournis par (3.6) sont idéaux et ne tiennent pas compte de paramètres géométriques "fins" du SLM tels que la distance inter-pixel ou la forme du pixel. Ce point, ainsi que la prise en compte des ordres supérieurs du réseau, est fondamental dans la mesure où l'énergie diffractée dans ces directions va constituer de la diaphonie potentielle, si elle est re-couplée fortuitement dans des fibres optiques de sortie. Ceci nécessite toutefois une modélisation bi-dimensionnelle, abordée au chapitre 4.

3.3.5 Adressage, bistabilité et transparence optique

Le mode d'adressage de la cellule est un critère déterminant ses performances spatiales et temporelles. On dénombre trois types d'adressage électrique d'un MSL à cristal liquide :

- l'adressage *direct*, où chaque pixel est excité indépendamment par une électrode. Cet adressage élémentaire est simple et rapide, mais il est clair qu'un nombre important de pixels entraînera des difficultés de réalisation de la connectique. Cette technique sera utilisée pour des barrettes de cristal liquide monodimensionnelles à définition limitée, telles que le composant 1×128 pixels, que nous avons réalisé et testé dans [12];
- l'adressage *matriciel* est une première solution pour les SLM bidimensionnels, constitués d'un réseau d'électrodes disposées en lignes et en colonnes indépendantes. Chaque pixel correspond à l'intersection d'une ligne et d'une colonne qui seront activées par multiplexage temporel pour contrôler le pixel en question. Cette technologie est principalement utilisée dans les écrans plats des ordinateurs portables et dans les écrans LCD

utilisés en transmission. Elle demeure relativement lente en raison du temps d'adressage d'une ligne et d'une colonne (qq. ms pour adresser un écran de 512×512 pixels);

- L'adressage par *circuit VLSI* devient indispensable lorsque le besoin en terme de résolution du SLM devient trop important. Cette configuration réflective induit une faible épaisseur de la couche de cristal liquide, associée à de faibles tensions de commande du circuit VLSI. Ce dernier, composé d'électrodes d'adressage et de fonctions opto-électroniques additionnelles, est recouvert par le cristal liquide, l'ensemble étant lui-même "coiffé" d'une contre-électrode transparente comportant une couche d'ITO (fig. 3.14.a). Une couche de "passivation optique" à base de silicium permet d'augmenter la qualité optique de la surface réfléchissante du modulateur (fig. 3.14.b).

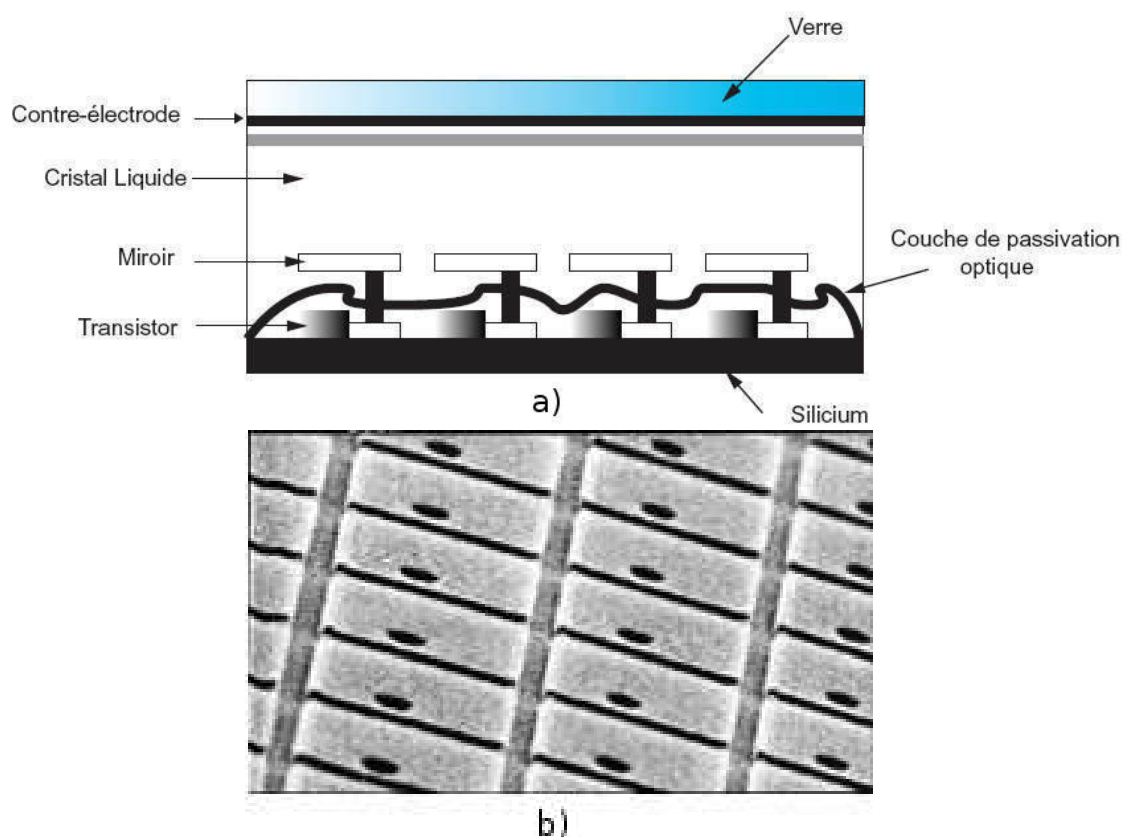


FIG. 3.14 – (a) Représentation en coupe d'une cellule de type LCOS – (b) vue de la matrice de miroirs, incluant une couche de passivation optique en dehors des pixels.

En théorie, les cellules à cristal liquide ferroélectrique sont bistables, c'est-à-dire que les molécules demeurent dans leur position d'équilibre jusqu'à inversion du champ électrique, simplifiant par la même le schéma d'adressage. En réalité, le schéma d'alignement à la surface de la cellule et les états parasites²² apparaissant dans les cellules réelles provoquent une relaxation des molécules de cristal liquide, réduisant le contraste de la modulation, donc transférant

²²chevrons, bookshelf, entre autres

de l'énergie de l'ordre 0 dans l'ordre 1. Pour corriger ce problème et maintenir les molécules de cristal liquide en position, une tension quasi-continue aux bornes du cristal est nécessaire, mais ceci entraîne une migration des impuretés ioniques de la structure vers la couche d'alignement de la cellule risquant la dégradation de cette dernière. Afin de conserver un champ électrique d'adressage à valeur moyenne nulle (DC balance) une méthode d'adressage basée sur l'inversion périodique des tensions imposées à la cellule est classiquement utilisée. Cette méthode convient parfaitement lorsqu'elle est utilisée dans des applications d'affichage, le temps d'inversion de l'image n'ayant pas d'influence sur la perception visuelle. Dans notre cas de déflecteur FLC à modulation binaire, inverser l'image affichée revient à translater le réseau de diffraction d'une demi-période. Ceci n'entraîne en théorie pas de variation de puissance dans l'ordre diffracté²³. On peut donc envisager des séquences de défilement des réseaux pour maintenir l'information de modulation, tout en préservant le rafraîchissement du cristal liquide. Toutefois, le temps de transition d'une image à son inverse prend quelques dizaines de μs , durée pendant laquelle l'information affichée sera fortement perturbée. Les canaux optiques défléchis à l'intérieur de l'aiguilleur optique étant porteurs d'un signal numérique au débit nominal de 10 Gbit/s, des fluctuations de puissance du faisceau lumineux seront donc observées sur des durées très largement supérieures à la durée d'un bit (100 ps), d'où une forte dégradation du taux d'erreur binaire.

A ce stade, la problématique d'adressage temporel des modulateurs FLC pour l'aiguillage optique tient en deux conditions :

1. A l'échelle *globale* du composant : maintenir une connexion stable et continue vis-à-vis du temps bit dans la direction de déflexion.
2. A l'échelle *locale* d'un pixel : assurer localement un champ électrique d'adressage du CL à valeur moyenne nulle afin de préserver l'intégrité du dispositif.

Nous avons proposé et testé sur plusieurs types d'aiguilleurs la méthode dite de "perturbation", consistant à inverser une fenêtre de quelques pixels sur la réseau de déflexion. Cette opération n'entraîne pas de dégradation significative spatiale et temporelle du faisceau défléchi et injecté dans la fibre de sortie. La fenêtre de perturbation (connexe ou non) est déplacée en continu selon un mouvement progressif ou aléatoire, jusqu'à ce que l'on ait rafraîchi la totalité des pixels du modulateur. La figure 3.15 confronte des résultats de simulation à une mesure expérimentale [16]. La perte de puissance pour une position centrale de la fenêtre est maximale car l'éclairement du faisceau Gaussien y est maximal à cet endroit. Les paliers absents sur la simulation sont dus au suréchantillonnage temporel des mesures. Cette méthode de rafraîchissement a permis de maintenir une connexion optique à 10 Gbits/s avec une pénalité de puissance en sortie inférieure à 0,2 dB [14], établissant la transparence optique du schéma d'adressage du modulateur.

²³la transformée de Fourier étant invariante par translation

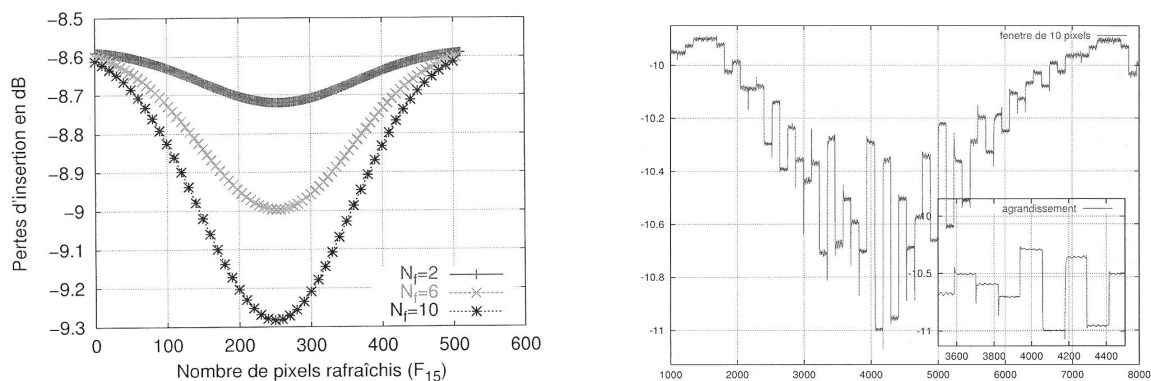


FIG. 3.15 – Evolution des pertes d'insertion dans un aiguillage vers la fibre 4 en fonction des paramètres de la fenêtre glissante pour (a) une simulation logicielle pour différentes valeurs de la position et de la taille de la fenêtre et (b) la mesure expérimentale correspondant à une fenêtre de 10 pixels.

3.4 Démonstrateurs d'aiguillage optique 1D : résultats

3.4.1 Phase 1 : modulateur FLC 1×256 pixels

Un premier défecteur monodimensionnel opérationnel a été intégré et testé par P. Berthélé [67] dans le cadre d'un lot du contrat CNET/GISOO²⁴ portant sur l'aiguillage optique. La cellule en transmission comportait 256 pixels de $22 \times 6 \mu\text{m}$ et la gravure du masque d'électrode ITO a été effectuée au département PIH du CNET Lannion. La pupille rectangulaire du MSL rendait impossible un aiguillage de fibre à fibre à fort taux de couplage, mais tel n'était pas l'objectif : on ne visait qu'à montrer la faisabilité de cellules FLC à large angle de tilt à déflexion indépendante de la polarisation d'entrée. L'alignement et l'assemblage de la cellule FLC ont été réalisés par Laurent Dupont, du département d'optique de Telecom Bretagne, en utilisant un cristal liquide à large angle de tilt (Chisso CS 2005, $\theta = 43^\circ$). La détermination de l'épaisseur optimale de la cellule fournissant une lame demi-onde à 1550nm passe par la connaissance de la biréfringence du CL à cette longueur d'onde, mesurée à l'interféromètre de Fabry-Pérot à $\Delta n = 0,11$ [11]. Un mauvais choix d'espacements a provoqué un décalage du fonctionnement optimal autour de 850 nm. Le fonctionnement du MSL en déflexion a toutefois été testé en affichant des réseaux périodiques (figure 3.16.a) et en mesurant l'éclairement des ordres 0 et ∓ 1 (figure 3.16b). Les courbes de la figure 3.17 montrent une efficacité de diffraction moyenne mesurée de 28% (valeur théorique : $\frac{4}{\pi^2} = 41\%$) et une variation de cette valeur inférieure à 10% pour une rotation de la polarisation d'entrée de 90° . En cause, les pertes de Fresnel et le réseau de diffraction "fantôme" créé par la grille d'électrodes en ITO, malgré le dépôt de ce dernier en couche mince de 200 Å. Ces valeurs toutefois encourageantes nous ont poussé à passer à l'étape suivante.

²⁴Groupement d'intérêt scientifique en optique et optronique, regroupant en 1996 les principaux pôles de recherche Bretons impliqués dans les télécoms optiques.

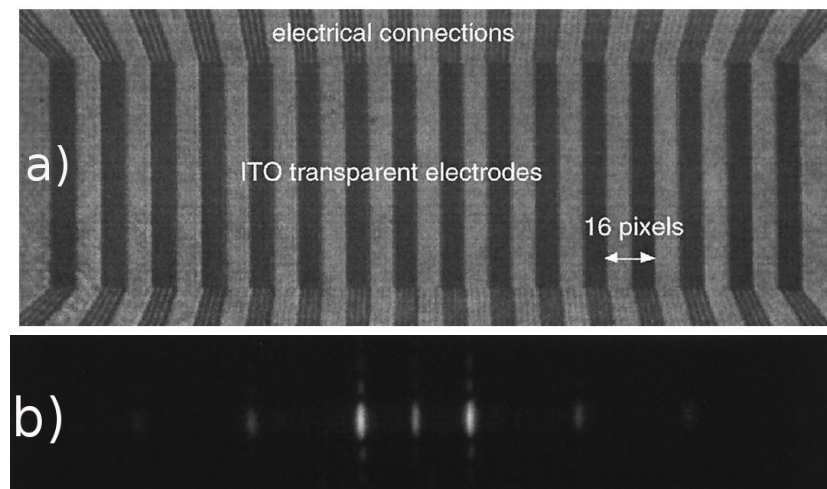


FIG. 3.16 – (a) Vue de la zone modulante d'un modulateur FLC comportant 256 pixels, affichant un réseau périodique de phase binaire de 16 pixels par période. – (b) Eclairage diffracté correspondant dans le plan de Fourier. On note (i) la décroissance caractéristique de la puissance des ordres diffractés en sinus cardinal, (ii) la forme oblongue des ordres due à la faible extension de la pupille dans la direction verticale et (iii) la présence d'ordre 0 résiduel.

3.4.2 Phase 3 : aiguilleur optique 1×14 fibres

Fort de notre expérience précédente, l'objectif est ici l'intégration d'un dispositif d'aiguillage vers 14 fibres. Cette étude a été menée dans le cadre du projet CRISTO [14], labellisé par le RNRT en 2000. Pour atteindre la capacité d'adressage visée, la définition du MSL passe à 512 pixels et la résolution à $15 \mu\text{m}$. Nous avons entièrement revu l'architecture du composant précédent. L'innovation repose ici dans le fonctionnement du modulateur en réflexion, permettant d'augmenter la compacité du déflecteur tout en facilitant l'alignement des composants. Pour ce faire, une couche réfléchive d'aluminium sert de contre-électrode. Les pistes d'électrodes restent gravées sur une couche d'ITO déposée sur une plaque de verre de qualité optique, mais sont organisées suivant une pupille circulaire (figure 3.18), de taille adaptée au faisceau incident dans le plan de déflexion de l'aiguilleur. Le cristal liquide utilisée est encore le CS2005, caractérisé à la section précédente. L'épaisseur optimale de la cellule est ici la moitié de celle d'une cellule en transmission, soit ici $3 \mu\text{m}$ pour obtenir une modulation de phase de π radians. Les interfaces matérielles et logicielles ont été conçues par M. Razzak et E. Daniel, du département d'Optique de Telecom Bretagne. La gestion logicielle de la déflexion est gérée par une interface homme-machine développée sous le logiciel LABVIEW. Les signaux électriques générés sont transférés à l'électronique de command du modulateur par le port parallèle du PC. L'optique de collimation/focalisation est un doublet achromatique²⁵ de focale 40,5 mm (à $\lambda = 1550 \text{ nm}$) et de diamètre 15 mm. L'utilisation d'un déflecteur opérant en réflexion permet d'exploiter le montage $4f$ en version repliée. Cette géométrie a été utilisée dans [16] et présente plusieurs avantages, dans la mesure où l'alignement des composants est la phase critique dans l'assemblage d'un aiguilleur ou d'un

²⁵Melles Griot 01LAL011

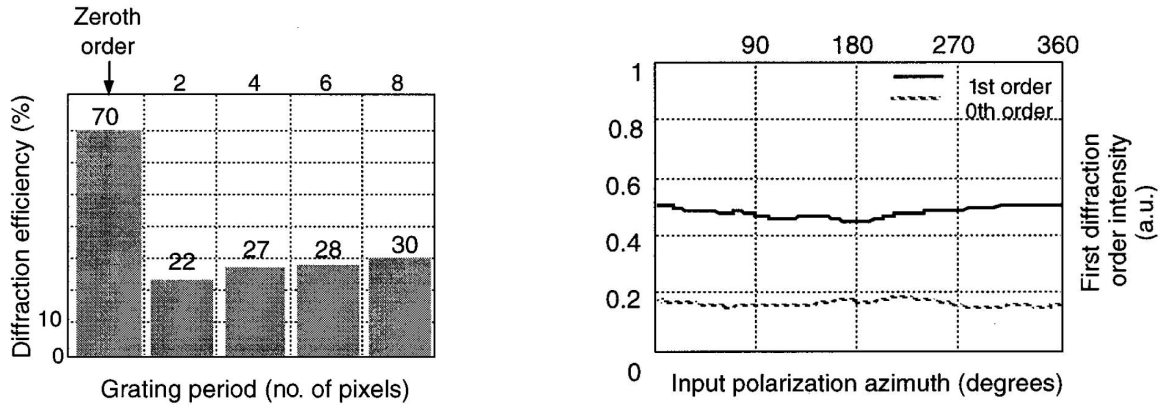


FIG. 3.17 – Mesures réalisées sur le composant de la figure 3.16 : (a) efficacités de diffraction mesurées pour différentes périodes de réseaux (de 2 à 8 pixels par période) – (b) Variation de l'efficacité de diffraction avec l'angle de polarisation incidente (linéaire) par rapport à l'axe des pixels du SLM.

commutateur en espace libre :

- un volume du dispositif diminué d'un facteur 2,
- une seule lentille est nécessaire, assurant l'uniformité des paramètres (focale, aberrations) et éliminant le problème de l'alignement des optiques
- la fibre d'entrée et les fibres de sorties sont positionnées dans un composant unique, simplifiant également l'alignement du système.

La barrette de fibres optiques a été réalisée sur cahier des charges par l'entreprise HIGH-WAVE Optical Technologies suivant une technologie développée par Jobin-Yvon pour ses multiplexeurs/démultiplexeurs à réseau de diffraction. Elle comporte 16 fibres monomodes à gaine amincie positionnées et alignées dans des micro-sillons (V-grooves) gravés sur substrat de silicium, pris en sandwich entre deux plaques de verre (figure 3.19.a). La position irrégulière des cœurs des fibres ((figure 3.19.b) est calculée pour éviter les ordres de diffraction parasites et minimiser ainsi le diaphonie spatiale au niveau de chaque fibre. Ce point sera généralisé à l'aiguillage bidimensionnel, présenté au chapitre 4. La barrette comporte 14 fibres de sortie, la fibre d'entrée ainsi qu'une fibre dite "tampon" positionnée pour récupérer l'ordre 0 de diffraction et nous permettant ainsi de suivre simultanément l'état du canal d'entrée et du déflecteur en temps réel. Des mesures précises de la position réelle des fibres font apparaître une erreur de positionnement moyenne de $2,1 \mu\text{m}$ par rapport aux positions théoriques. On en déduit des pertes de connexions supplémentaires de 1 dB, compensable par un ajustement de l'angle de déflexion par quasi-période (vu en 3.3.1, page 49).

Le prototype d'aiguilleur intégrant les composants précédents est représenté sur la figure 3.20. Les résultats de mesure des pertes d'insertion de fibre-à-fibre sont fournis sur la figure 3.21. On constate que la bande-passante est très large pour les fibres les plus proches de l'axe optique (peu de variations sur la bande C). La bande-passante à X dB a été calculée dans [80] en fonction du nombre de pixels par période, N_i , de la taille du pixel, δ et de la focale de l'objectif :

$$\Delta\lambda = \frac{2}{\sqrt{10 \log(e)}} \frac{\omega_0 N_i \delta}{f} \sqrt{X} \quad (3.7)$$

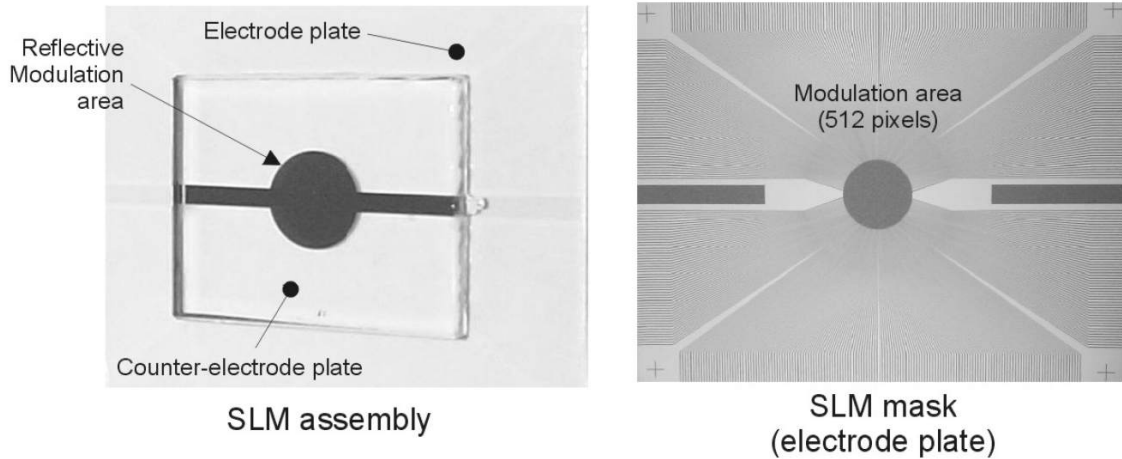


FIG. 3.18 – (a) Vue de la cellule 1×512 pixels intégrée. Le disque noir correspond à la contre-électrode – (b) masque d'adressage direct de la cellule, utilisé pour la gravure des électrodes d'ITO.

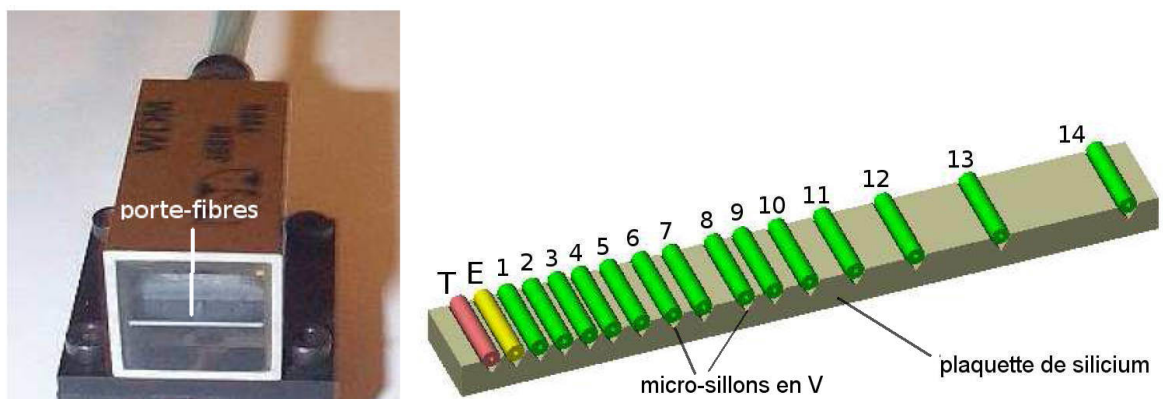


FIG. 3.19 – (a) barrette de fibres 1×14 avec porte-fibres sur plaquette de silicium et (b) géométrie du porte-fibres à implantation de canaux non-régulière. Le diamètre des fibres est de $30 \mu\text{m}$ (gaine amincie) et la distance (cœur à cœur) entre les deux fibres voisines située à gauche de la barrette (i.e. fibre d'entrée "E" et fibre tampon "T") est de $35 \mu\text{m}$.

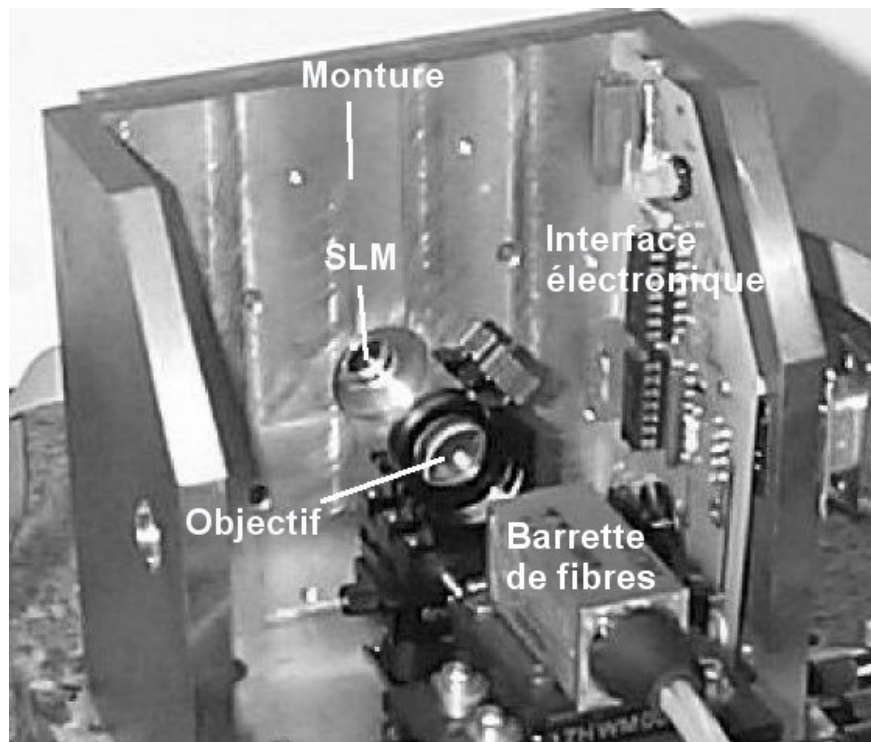


FIG. 3.20 – Prototype d'aiguilleur optique à 14 voies, optimisé pour un fonctionnement dans la bande spectrale d'une transmission WDM.

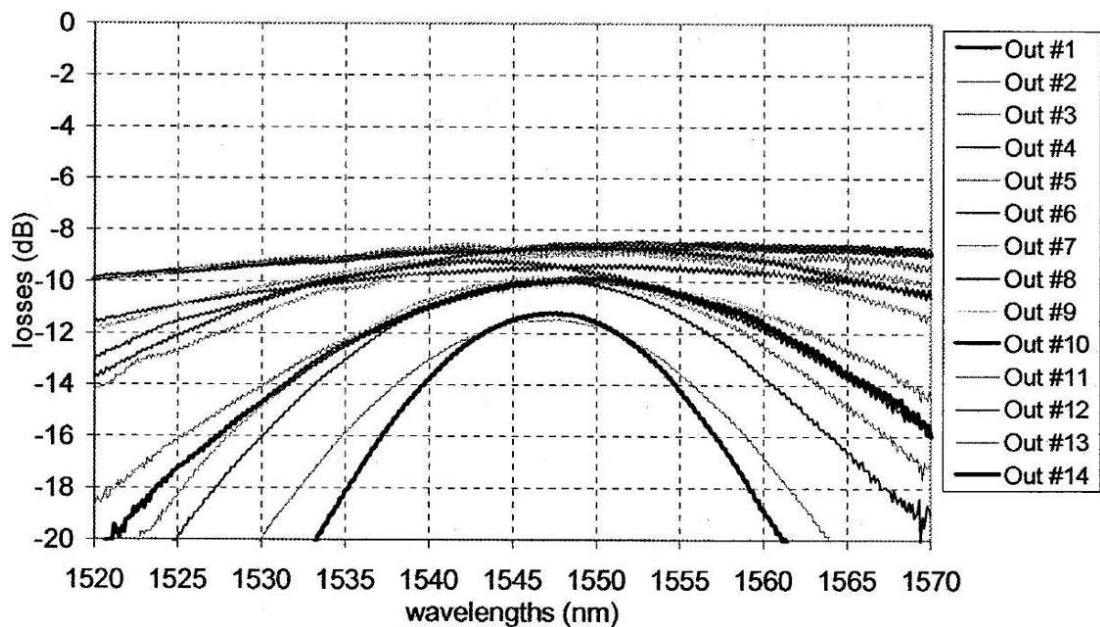


FIG. 3.21 – Pertes d'insertion et réponses spectrales mesurées des différentes sorties de l'aiguilleur optique de la figure 3.20

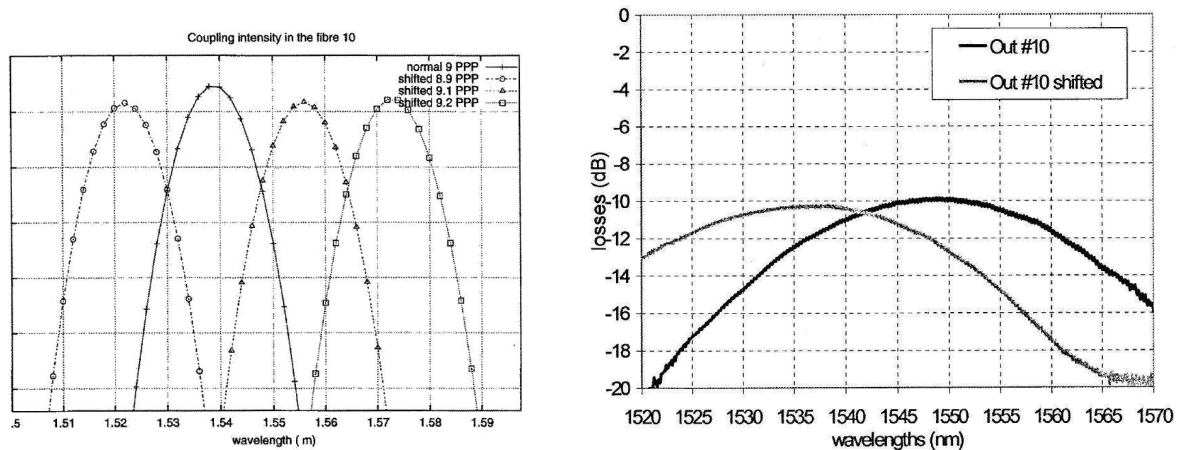


FIG. 3.22 – (a) Déplacement de bande-spectrale aiguillée dans une fibre optique pour des variations de quasi-période (a) simulations et (b) mesures expérimentale sur l’aiguilleur 1×14 .

La bande-passante se réduira donc au fur et à mesure que l’on s’éloigne de l’axe optique, la déflexion mettant en jeu des réseaux de plus en plus dispersifs. Elle est de l’ordre de 15 nm pour la fibre F_{14} , la plus éloignée. On a utilisé le concept de quasi-période pour déplacer la bande spectrale aiguillée dans une fibre donnée. Une variation infinitésimale du nombre de pixels par période, δN , va entraîner, à angle de déflexion constant, une variation $\delta\lambda$ de la longueur centrale de la bande spectrale vue par la fibre. Cette variation est donnée par $\delta\lambda = \lambda\delta N/N$ [16]. La figure 3.22 montre des résultats de simulations et des mesures expérimentales pour la fibre 10 de l’aiguilleur 1×14 . Des variations relatives $\delta N = 0,1$ induisent dans les deux cas un déplacement de la bande spectrale de 15 nm, sans perte supplémentaire. Précisons que cette fonction d’aiguillage spectral avait fait l’objet d’un dépôt de brevet [81] avant la publication qui en communiquait le principe [14].

Enfin, des mesures dynamiques sur le prototype ont été réalisées dans les laboratoires de recherche d’Alcatel-Lucent, dans le cadre du projet CRISTO. La transparence optique du dispositif au débit de 10 Gbit/s a été établie, avec une pénalité en puissance mesurée à moins de 0,2 dB, pour un TEB de 10^{-9} . L’indépendance de l’aiguillage à la polarisation a également été validé, avec une PDL de l’ordre de 0,6 dB. La diaphonie spatiale moyenne mesurée pour chaque configuration d’aiguillage s’est échelonnée de -45 à -21 dB. Ces chiffres sont satisfaisants dans le cas d’une géométrie 1D. On peut toutefois espérer rejeter le pire cas (-21 dB) à des valeurs inférieures à -40 dB en passant à une géométrie d’adressage des fibres bidimensionnelle. Nous terminons en précisant que le fonctionnement en aiguillage multivoies a également été validé [16].

3.5 Conclusions

Dans ce chapitre, nous avons bâti pas-à-pas une structure d’aiguillage optique entre fibres optiques monomodes, à partir d’un cahier des charges fourni par nos partenaires industriels de contrat. Les contraintes imposées par la transmission optique WDM sont très strictes, tant

au niveau des caractéristiques spatiales que temporelles du dispositif, ce dernier devant se montrer transparent vis-à-vis de flux numériques au débit de 10 Gbit/s. Tirant parti de notre expérience exposée au chapitre 2, nous avons montré que l'holographie dynamique reconfigurable (HDR) sur MSL à cristal liquide ferroélectrique permettait, moyennant adaptation technologique, de satisfaire la quasi-intégralité des clauses du cahier des charges imposé. L'approche retenue était ambitieuse, dans la mesure où nous avons choisi de concevoir les composants et d'intégrer les démonstrateurs par nos propres moyens. Ayant la chance d'évoluer dans une structure disposant d'une expertise reconnue et de moyens technologiques importants dans les deux domaines-clé (i.e. conception/fabrication d'éléments diffractants et composants à cristal liquide), nous avons franchi les étapes avec succès. Un résultat déterminant a été l'intégration d'un aiguilleur à 14 voies, testé et validé par un équipementier reconnu du monde des télécommunications.

L'issue de ce cycle d'études aurait été sans doute différente sans le travail parfois acharné des doctorants concernés, et sans les échanges assez réguliers avec des équipes de recherches et leurs responsables, travaillant sur des sujets identiques ou voisins : William Crossland (Université de Cambridge), Philippe Gravey (CNET de Lannion) ou Ludovic Noirie (ALcatel).

Les perspectives dégagées à l'issue de ce travail étaient simples : poursuivre l'étude en augmentant la capacité du dispositif, moyennant le passage à une géométrie d'adressage bidimensionnelle ... objectif nécessitant des financements substantiels pour le développement technologique des composants adéquats.

Cette étape est exposée au chapitre suivant.

Chapitre 4. *Aiguillage optique de forte capacité pour les réseaux optiques*

A la suite des études concernant les interconnexions optiques reconfigurables, nous nous sommes intéressés à l'intégration de dispositifs d'aiguillage de forte capacité, nécessitant le passage à des géométries de commutation réellement bidimensionnelles. Comme nous le verrons dans ce chapitre, le problème central fut de mettre en œuvre des technologies performantes dont nous avons déjà effectué les dimensionnements. A travers les thèses de Chidi Uche [82] et de Cédric Letort [66], ces travaux ont fait l'objet d'une collaboration académique avec l'Université de Cambridge, d'une collaboration industrielle avec France Telecom et Alcatel, acteurs majeurs du monde des télécommunications (via le Projet CRISTO), et du soutien financier du composantier Breton OPTOGONE, racheté par la société MEMSCAP en 2004.

4.1 Modulateur FLCOS pour la déflexion de faisceau à 1,55 μm

En ligne directe des travaux exposés au chapitre 3, la réalisation d'un prototype de modulateur FLCOS en définition VGA¹ adapté à l'aiguillage spatial à 1,55 μm avait fait l'objet d'une première étude, en collaboration avec l'Université de Cambridge (département d'Engineering) de 2000 à 2002, via la thèse de Chidi Uche [82], co-encadrée avec le Prof. W. Crossland. Ce travail fut soutenu par le projet CRISTO, déjà évoqué. L'objectif du volet "aiguilleur" était l'intégration d'un dispositif à 32 voies, fonctionnant en déflexion bidimensionnelle via un SLM à cellule FLCOS. Le fonctionnement de ce prototype était cependant fortement limité par les performances modestes du SLM (fig. 4.1.a), liées à des défauts intrinsèques à la cellule à cristal liquide employée et au schéma électrique imparfait du circuit VLSI. En outre, la définition moyenne du modulateur limitait la capacité d'adressage en nombre de sorties. Le recours à un modulateur FLCOS bidimensionnel de plus forte définition présentant de bonnes qualités de modulation et un schéma électronique éprouvé semblait donc incontournable. L'étude, le développement et la réalisation d'un composant spécifiquement adapté à notre application représentant un coût financier peu rationnel, nous avons sélectionné un produit commercial dédié à l'affichage visible et présentant des caractéristiques proches de nos besoins, dans le but d'optimiser son fonctionnement pour notre application. Cette étude

¹(640 × 512 pixels)

fut financée par un partenariat avec la société OPTOGONE, et fit l'objet d'un contrat avec la société Britannique CRLOpto², de 2002 à 2003. Les travaux furent suivis à Edimbourg par Kevin Heggarty, à l'occasion de son séjour sabbatique au sein de la société.

Le cahier des charges imposé lors de cette opération était encore guidé par les impératifs par commutation optique transparente en bande C :

- L'efficacité de diffraction du modulateur doit être maximale à la longueur d'onde de $1,55 \mu\text{m}$, imposant une épaisseur de cellule plus importante que celle des composants fonctionnant dans le visible. On doit viser une configuration de modulation de phase pure.
- Il est important d'obtenir une cellule présentant la meilleure qualité optique possible (planéité, rugosité), des défauts de la cellule entraînant des déformations du front d'onde défléchi, abaissant la valeur du taux de couplage de la lumière en sortie.
- Les pertes optiques induites par le modulateur ne doivent pas varier selon la polarisation d'entrée. Ce point, ainsi que le précédent, ne fait pas partie du cahier des charges des composants "standard" commercialisés par la société, utilisés pour le micro-affichage³
- Le composant doit être transparent optiquement pour des débits de transmission très importants (10, voire 40 Gbit/s). Or la méthode classique d'affichage classique, basée sur une inversion périodique des tensions, entraîne, à l'échelle de la modulation du canal optique, une micro-coupe de la connexion optique réalisée par le système, ayant pour conséquence une augmentation du taux d'erreur binaire sur les données transmises. Un schéma spécifique pour notre application devait donc être développé, comme au chapitre précédent.
- Une grille bidimensionnelle avec une forte définition (au moins 1000×1000 pixels) est requise afin d'augmenter la capacité d'adressage du module de commutation, tout en offrant la possibilité d'affichage de fonctions optiques plus complexes telles que la déflexion multiple ou l'apodisation de la fenêtre de déflexion.

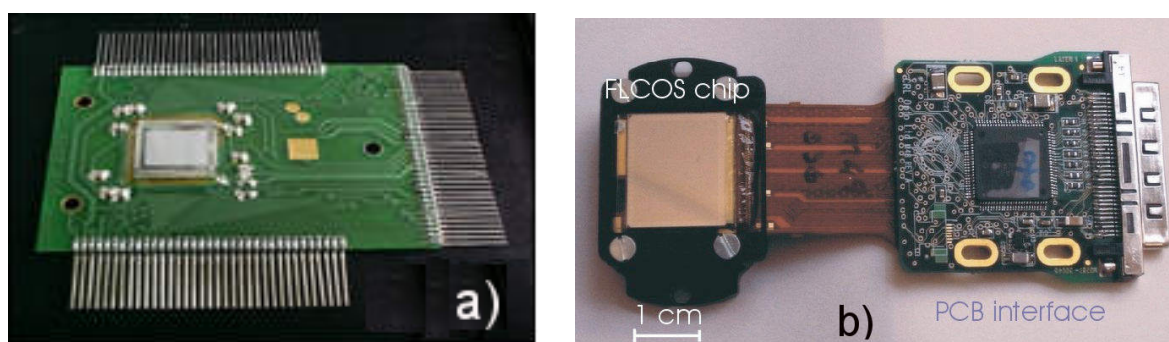


FIG. 4.1 – (a) Modulateur FLCOS en définition VGA (640×480 pixels), développée par le département d'Engineering de l'Université de Cambridge (1999) – (b) Modulateur FLCOS en définition SXGA (1280×1024 pixels) fabriqué par la société CRLOpto (2002).

²devenue par la suite CRLO Displays, puis Forth Dimension Displays

³écrans de video-projecteurs, afficheurs tête-haute...

Après une étude du marché des MSL en technologie FLCOS commercialisés à l'époque, notre choix s'est porté sur un composant de la société CRLOPTO, en définition SXGA⁴ et de résolution 13,6 μm . Le taux de remplissage annoncé est de 93% et le composant fonctionne en modulation binaire d'amplitude pour le visible (fig 4.1.b). L'adaptation du composant à la déflexion de faisceau à 1,55 μm et les résultats obtenus ont fait l'objet d'une publication dans la revue *Ferroelectrics* [17]. Nous en donnons juste les grandes lignes. Deux modifications principales ont été réalisées :

- fabrication d'une nouvelle cellule à cristal liquide (CHISSO 2005 à angle de tilt proche de la valeur optimale de 45°), avec une contre-électrode modifiée et une couche d'ITO plus fine,
- méthode de rafraîchissement adaptée. Le principe repose sur le défilement continu des réseaux de diffraction affichés sur le composant (fig. 4.2.a), de sorte que la valeur moyenne de la tension vue par un pixel est nulle dans le temps. K. Heggarty en a assuré l'implantation logicielle.

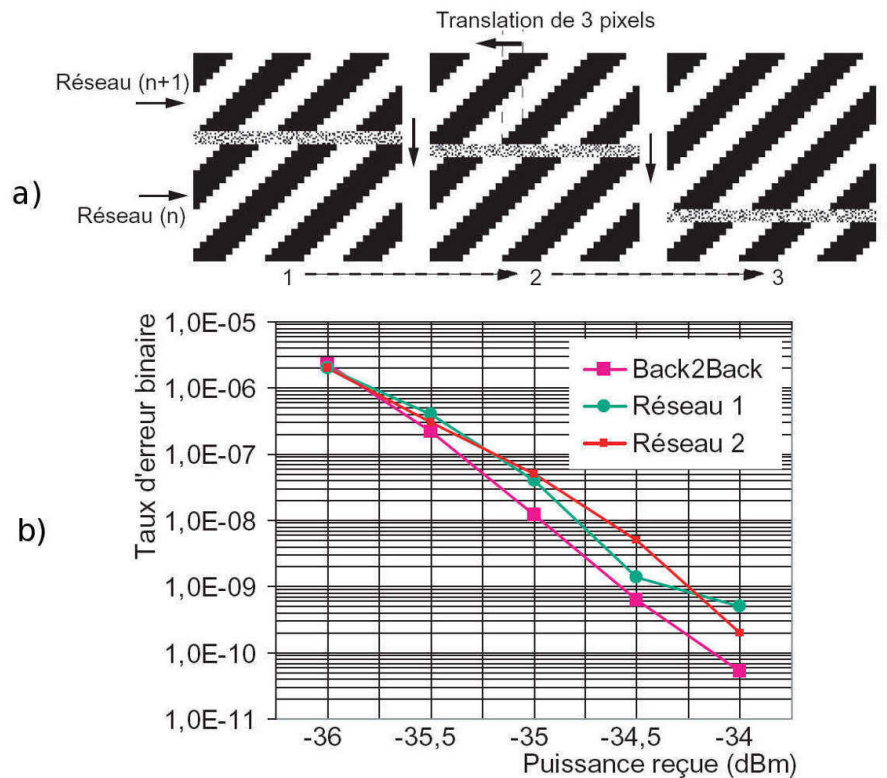


FIG. 4.2 – (a) Méthode de rafraîchissement du SLM FLCOS par translation d'image (réseau de diffraction). Le passage d'une image à l'autre se fait par défilement d'une fenêtre de mise à jour des pixels. (b) Courbe de TEB du SLM affichant la procédure de rafraîchissement par défilement. Le débit numérique aiguillé est de 10 Gbit/s.

Le nouveau composant a été testé à la longueur d'onde de $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$. Une efficacité de diffraction de 17% à température ambiante et 23% à 50°C a été mesurée. Ces valeurs

⁴Super eXtended Graphics Array, de définition 1280 \times 1024 pixels

relativement "moyennes" s'expliquent par les efficacités optiques perfectibles des interfaces, i.e. réflectivité des miroirs et absence de couches anti-reflet au niveau de la contre-électrode. Le temps de commutation du composant (temps de montée 10%-90%) a été mesuré à 750 μ s. La sensibilité des pertes à la polarisation (PDL) est inférieure à 1 dB, avec une marge d'erreur de $\pm 0,5$ dB pour la méthode utilisée.

La transparence temporelle du composant a été testée en le plaçant dans un système de transmission optique modulé à 10 Gbit/s au sein d'une fonction d'aiguillage vers deux fibres de sortie, l'une atteinte avec un réseau de déflexion de 12 pixels par période (ppp), l'autre de 24 ppp. Les courbes de TEB correspondantes sont fournies sur la figure 4.2.b. Elles montrent une pénalité en puissance inférieure à 0,6 dB pour les deux réseaux, validant la méthode de rafraîchissement utilisée.

4.2 Déflexion holographique 2D à modulation de phase binaire

Le choix d'un cristal liquide ferroélectrique s'est fait sur des critères de temps de commutation et d'indépendance à la polarisation du rendement de déflexion. La contrepartie est une quantification des niveaux des réseaux de phase affichés sur les deux états de la cellule. La binarisation des réseaux (ou plus généralement des hologrammes) affichés a pour effet de générer des ordres de diffractions additionnels potentiellement gênants pour les fibres non adressées dans le plan de sortie. Ce phénomène avait été traité pour la déflexion 1D par un positionnement adapté des fibres optiques, selon un espacement irrégulier. Le passage à deux dimensions va générer une constellation d'ordres parasites qu'il importe de localiser et de quantifier si l'on veut dimensionner le plan de fibres de sortie. Cette étude est détaillée dans la thèse de C. Letort [66] et publiée dans [20]. Ici encore, nous en résumons les grandes lignes.

Idéalement, la fonction de modulation de phase spatiale permettant d'adresser une fibre centrée au point (x_s, y_s) est donnée par :

$$R(x, y) = \exp \left[-2i\pi \left(\frac{xx_f}{\lambda f} + \frac{yy_f}{\lambda f} \right) \right] \quad (4.1)$$

La quantification de cette fonction de modulation sur deux niveaux de phase est schématisée dans le cas 1D sur la figure 4.3.a. Le processus opère par seuillage de la partie réelle de l'expression ci-dessus par rapport à un seuil σ , fournissant deux niveaux de phase $\{\varphi, \varphi + \pi\}$. Le seuillage opéré sur la figure 4.3.a fournit dans le cas bidimensionnel un réseau de phase binaire R_b , de rapport cyclique $\alpha(\sigma)$, se développant selon [69] :

$$R_b(x, y) = \underbrace{i(2\alpha - 1)}_{C_0} + 2i\alpha \sum_{n \neq 0} \underbrace{\frac{\sin \pi n \alpha}{\pi n \alpha}}_{C_n} \exp \left[-2ni\pi \left(\frac{x}{T_x} + \frac{y}{T_y} \right) \right] \quad (4.2)$$

où $T_x = \lambda f / x_f$ et $T_y = \lambda f / y_f$ (cas $\varphi = 0$). Les coefficients complexes C_n sont les amplitudes complexes des ordres de diffraction dans le plan de reconstruction. La position de ces ordres est indiquée sur la figure 4.4.b. La modélisation de la grille spatiale des pixels du SLM fait alors intervenir un échantillonnage-blocage suivi d'une érosion, pour tenir compte de la résolution finie du composant et de la zone inter-pixel. Le processus est schématisé sur

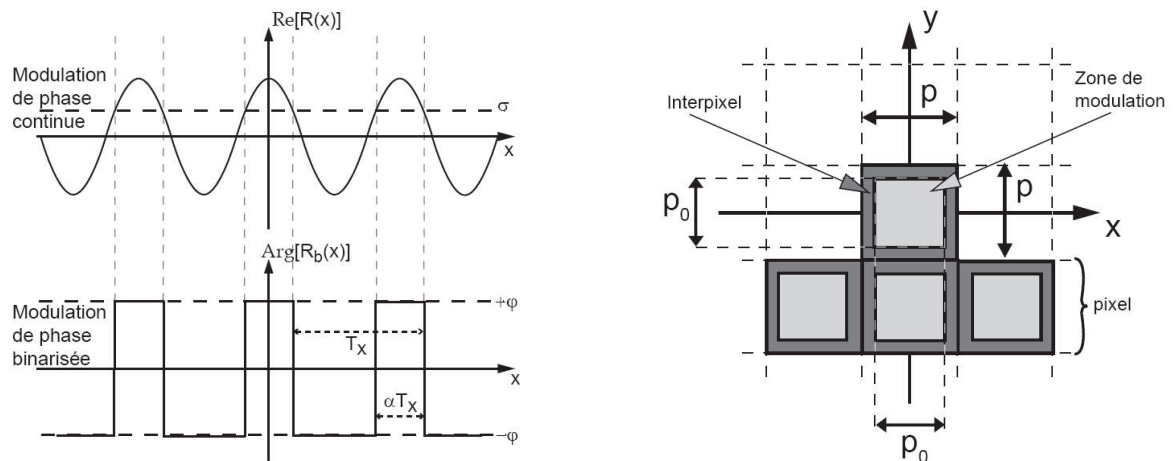


FIG. 4.3 – (a) Modèle de binarisation d'un réseau de phase périodique. La partie réelle est comparée au seuil σ – (b) Modèle spatial d'un pixel. La zone centrale, de taille $p_0 \times p_0$ est le pixel appliquant la modulation de phase. Les pixels sont séparés par l'inter-pixel, zone "morte" où la lumière n'est pas modulée.

les figures 4.4.c et 4.4.d, avec un schéma du plan de reconstruction correspondant à chaque étape [66].

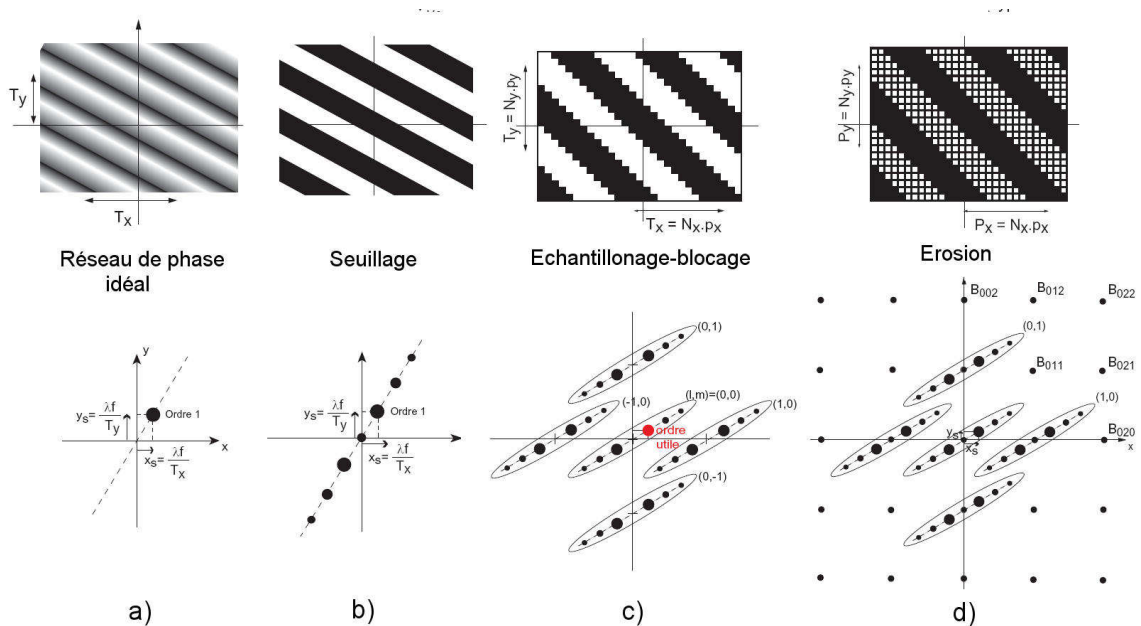


FIG. 4.4 – Transformations successives d'un réseau de phase idéal (a) jusqu'à la distribution réelle affichée sur le SLM de phase binaire (d), avec une vue schématique des ordres diffractés dans le plan de Fourier correspondant à chaque étape. L'éclairement relatif de chaque ordre n'est pas respecté.

Schématiquement, l'étape d'échantillonnage-blocage va dupliquer la distribution 4.4.b selon une grille bidimensionnelle au pas inverse de la résolution du SLM. La prise en compte de l'interpixel à l'étape d) induit une pondération globale de la figure de diffraction, ainsi

qu'une remontée de la puissance d'ordres supérieurs sur une grille bidimensionnelle de pas $(1/p, 1/p)$. L'efficacité de diffraction du réseau "réel" du cas 4.4.d est alors donnée par l'éclairement de l'ordre $(1,0,0)$ de la figure de diffraction [20]:

$$\eta(\alpha, N_x, N_y, T) = \frac{4}{\pi^2} T^2 \sin^2(\pi\alpha) \operatorname{sinc}^2\left(\frac{\sqrt{T}}{N_x}\right) \operatorname{sinc}^2\left(\frac{\sqrt{T}}{N_y}\right) \quad (4.3)$$

où $T = (p_0/p)^2$ représente le taux de remplissage du SLM. La courbe représentative de η pour $\alpha = 0,5$ et $T = 0,93$ (valeur correspondant à notre composant) est indiquée sur la figure 4.5.a. On peut noter une chute brutale de η pour les faibles valeurs de N_x et de N_y , confirmée par la courbe 4.5.b. En pratique, on évitera les réseaux présentant moins de 4 ppp dans l'une des deux dimensions, présentant une efficacité de diffraction inférieure à environ 30 %.

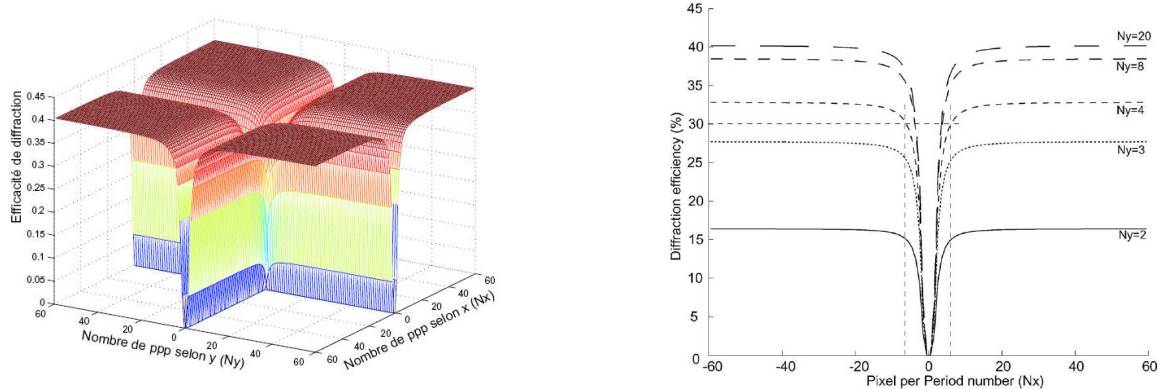


FIG. 4.5 – (a) Représentation de l'efficacité de diffraction d'un réseau "physique" dans le plan (N_x, N_y) – (b) Evolution de l'efficacité de diffraction en fonction de N_x pour différentes valeurs de N_y .

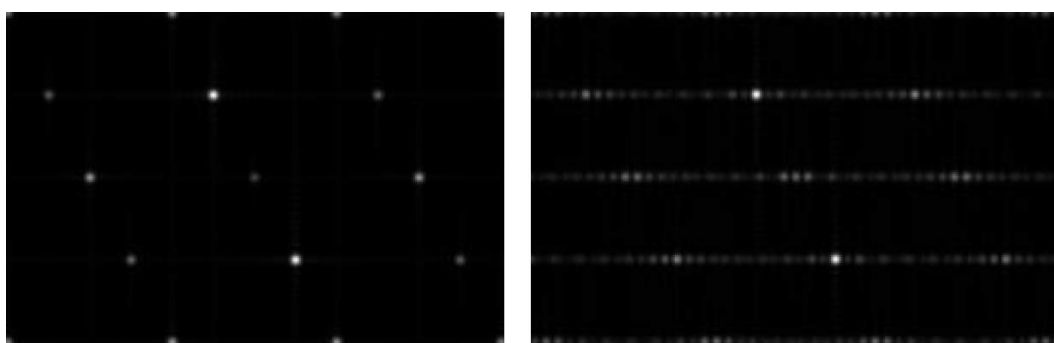


FIG. 4.6 – Reconstruction de deux réseaux de phase binaire de périodes spatiales voisines : (a) $N_x = 8$, $N_y = 4$ et (b) $N_x = 8$, $N_y = 3$, en utilisant un adressage par quasi-période. Dans le deuxième cas, les ordres parasites sont réhaussés par affichage du module du champ et non de son éclairement.

L'influence de l'affichage de réseaux "quasi-périodiques" bidimensionnels (i.e. valeurs non-entières de N_x et N_y) a également été simulé et testé expérimentalement [66], fournis-

sant la position et la puissance relative d'ordres parasites qui apparaissent sur une nouvelle grille, conjuguée de la "quasi-période" utilisée (cf fig. 4.6).

Même s'il est relativement complet, le modèle de plan de diffraction précédent pourrait intégrer un modèle physique de la cellule réelle à cristal liquide. Ce type d'étude généralement réalisée par simulation dans le cas de SLM à cristal liquide nématique. La modélisation de la cellule permet à la fois d'analyser l'influence de la couche d'alignement, de l'épaisseur du cristal liquide et des champs inter-électrodes. Ainsi, dans [83], le calcul précis de l'état de polarisation émergent d'un SLM affichant des réseaux à 4 niveaux de phase a permis de faire des calculs précis d'efficacité de diffraction. Dans notre cas toutefois, le fonctionnement élémentaire de la cellule SSFLC et le fait de ne considérer que de "grandes périodes" spatiales limitera les interactions intra-réseau. Nous nous sommes donc contenté du modèle présenté.

4.3 Matrice de fibres optiques optimisée pour la déflexion holographique

La détermination de la position et de l'éclairement relatif des ordres diffractés par un réseau de phase réel nous a autorisé à déterminer un plan d'adressage optimal du plan de fibres de sortie. Cette étape a été réalisée lors du travail de thèse de C. Uche [82] et poursuivie par C. Letort [66], menant à la réalisation physique de matrices de fibres monomodes bidimensionnelles. Nous avons adopté une procédure algorithmique, consistant à balayer de manière itérative l'espace fréquentiel discrétisé (N_x, N_y) , en scrutant la position adressée selon trois types de contraintes :

1. *collision* entre fibres : la position testée est refusée si elle se trouve au voisinage immédiat d'une fibre déjà positionnée, i.e. à une distance inférieure au diamètre de gaine des fibres.
2. diaphonie *antérieure* : la position testée est refusée si elle perturbe, par l'un de ses ordres supérieurs, une fibre déjà placée.
3. diaphonie *postérieure* : la position testée est refusée si elle se trouve sous l'influence d'un ordre supérieur d'un réseau adressant une fibre déjà placée. On calcule pour ce faire le taux de couplage de manière précise et on le compare au seuil défini (en général -35 dB).

L'algorithme précédent a donné lieu à deux générations de composants. La première, à géométrie dite " $1D_{\frac{1}{2}}$ " a été développée d'après les caractéristiques du SLM de la figure 4.1.a. La matrice –fabriquée selon notre cahier des charges par HIGHWAVE Optical technologies– comporte deux rangées de 17 fibres alignées sur les deux faces d'un substrat de silicium (fig. 4.7.a). Les fibres optiques possèdent des gaines amincies à $30 \mu\text{m}$. La deuxième génération possède une géométrie réellement 2D. La figure 4.7.b montre un masque d'implantation pouvant accueillir 128 fibres. Le placement est optimisé selon la procédure déjà décrite et permet de rejeter la diaphonie à des niveaux théoriques bien inférieurs à -35 dB. L'étape-clé est la réalisation matérielle de ce composant, en raison de la précision de positionnement des fibres monomode requise ($\pm 0,5 \mu\text{m}$).

L'étude de fabrication des matrices de fibres 2D a été financée par un contrat entre la société OPTOGONE et le département d'Optique de Telecom Bretagne. Le principe de l'alignement

des fibres repose sur le perçage de micro-trous dans une plaquette de silicium (le porte-fibre). Outre la précision requise sur la forme du trou, circulaire et d'un diamètre légèrement supérieur au diamètre de la gaine des fibres⁵, la difficulté concerne le contrôle de la forme de guidage dans l'épaisseur de la plaquette. On choisit de guider la fibre sur une distance d'environ quatre fois son diamètre.

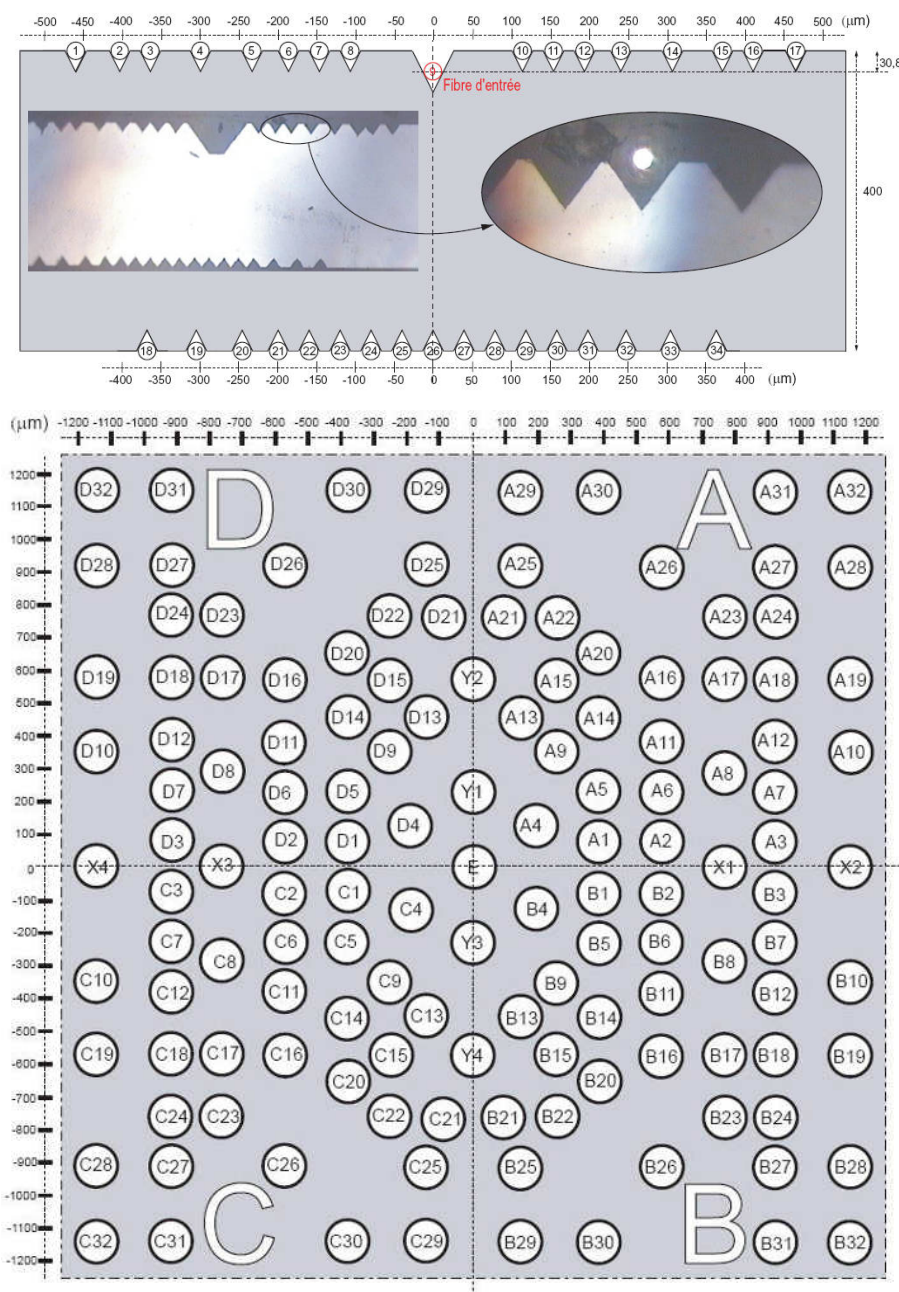


FIG. 4.7 – Schéma d'implantation de matrices de fibres adaptées à la déflexion holographique bidimensionnelle. Les dimensions indiquées sont en micromètres.

⁵ $125 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$, entraînant un diamètre de trou requis de l'ordre entre $126 \pm 0,5 \mu\text{m}$.

L'optimum est donc un trou conique percé sur une plaquette de $500\ \mu\text{m}$ d'épaisseur, avec le diamètre débouchant déjà mentionné. L'opération a été réalisée par la société Grenobloise PHS MEMS, selon un procédé de gravure sèche profonde⁶. La maîtrise du procédé menant à la satisfaction de notre cahier des charges a nécessité six mois de travaux. Les nombreuses mesures et caractérisations de composants ont été réalisées par G. Mouzer, de la société OPTOGONE.

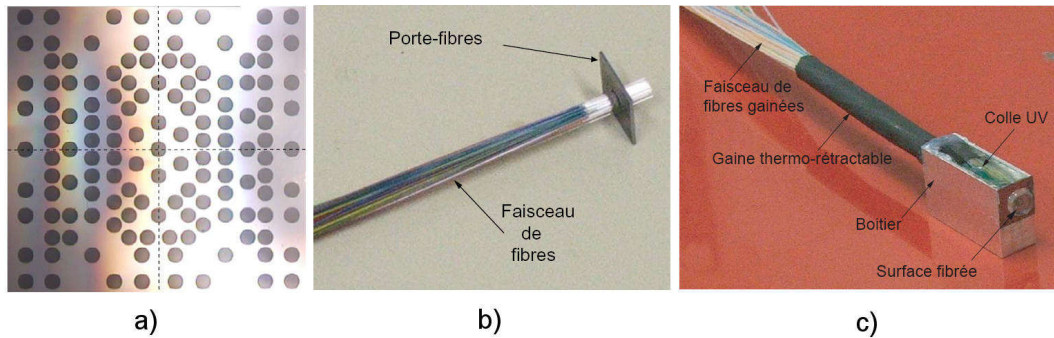


FIG. 4.8 – (a) matrice de trous gravés sur plaquette en silicium – (b) porte-fibres – (c) matrice de fibres terminée.

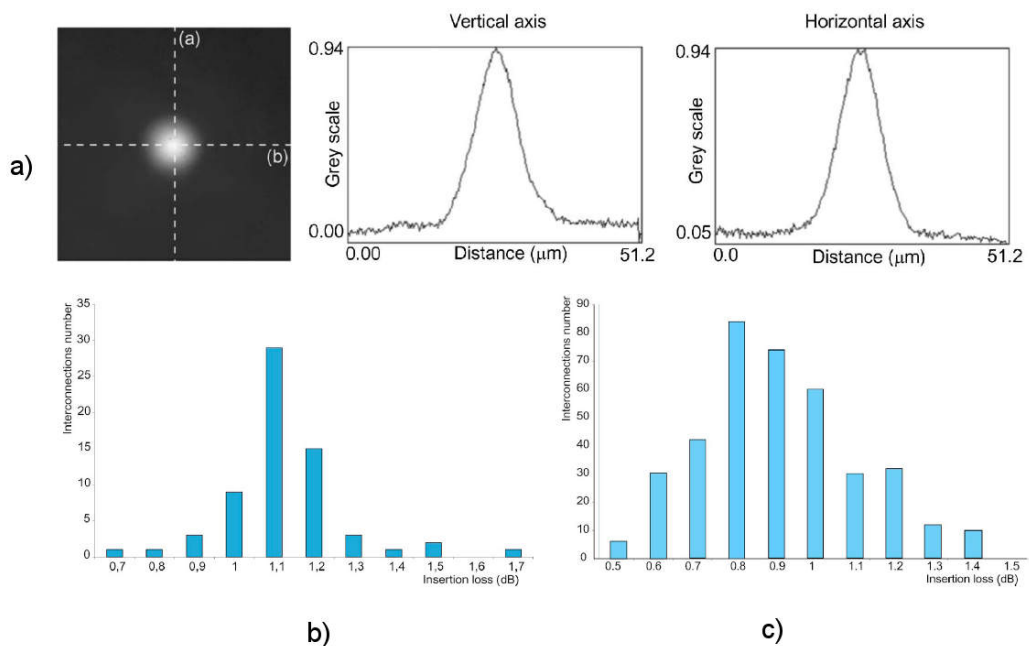


FIG. 4.9 – (a) Caractérisation en champ proche d'une fibre émise par la matrice précédente et profils d'éclairage correspondants – (b) histogramme des pertes de couplage mesurées sur une matrice de 32 fibres et (c) sur une matrice de 64 fibres.

⁶Technique de gravure plasma combinant à la fois des effets de bombardement d'ions et une réaction chimique

Une fois les porte-fibre réalisés, la fabrication de la matrice commence avec l'étape d'enfilage et le collage des fibres, opération délicate et longue car nécessitant une précision très importante. Le processus a été mis au point par Bruno Vinouze, enseignant-chercheur au département d'Optique de Télécom Bretagne. La figure 4.8.b montre une plaquette "enfibrée" comportant 64 fibres. La seconde étape est le gainage : chacune des fibres est insérée dans une gaine de $600\ \mu\text{m}$, afin de renforcer sa tenue mécanique. L'ensemble des fibres est lui-même rassemblé dans une gaine thermorétractable. Le porte-fibres est ensuite inséré dans un boîtier métallique est fixé par colle photopolymérisable. La dernière étape est la plus délicate : le polissage collectif des fibre, visant à conférer une qualité optique à la surface fibrée. Cette étape a été développée conjointement par Bruno Vinouze et Cédric Letort. Le composant final est illustré sur la figure 4.8.c.

Des matrices à 32 et 64 fibres ont été intégrées et caractérisées optiquement [20], (i) en examinant les champs proches émis par les fibres et (ii), en mesurant les pertes d'insertion de fibre-à-fibre. Cette dernière opération est réalisée en remplaçant le SLM par un miroir dans le montage optique de l'aiguilleur. Les résultats de mesure sont indiqués sur la figure 4.9 et traduisent des composant d'excellente qualité.

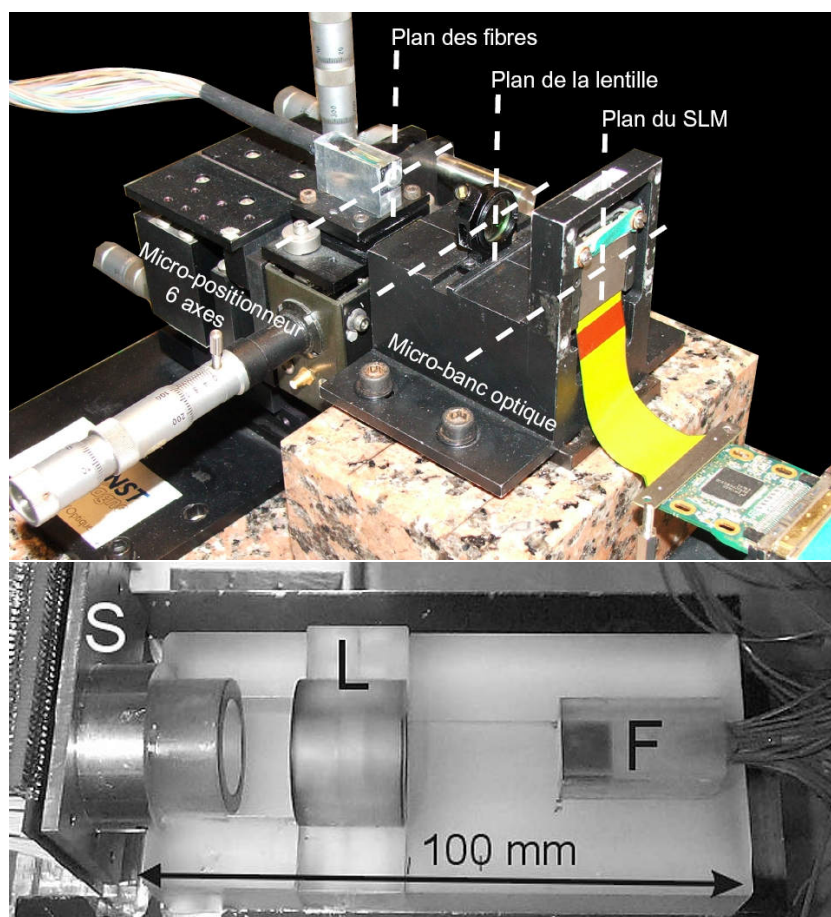


FIG. 4.10 – Démonstrateurs s'aiguillage optique bi-dimensionnel : version éclatée (haut) et version intégrée sur mini-montures en silice (bas) dont pièces ont été usinées sur cahier des charges par la société HERAEUS.

4.4 Intégration et test d'un aiguilleur optique spatio-fréquentiel

Un aiguilleur optique 2D a été intégré avec les composants présentés dans ce chapitre. La figure 4.10.a donne une vue du dispositif dans sa version démonstrateur, utilisant des montures métalliques classiques et un nano-positionneur sur banc de granite massif. Par manque de temps, nous n'avons pas pu l'intégrer dans une version prototypale sur mini-banc de silice (fig. 4.10.b, sur une idée développée au cours du projet CRISTO et publiée dans [84]). L'avantage de cette dernière est évident en termes de stabilité mécanique et d'insensibilité aux variations de température. Le dispositif a été testé sur une série de 19 voies (à $\lambda = 1550$ nm). Pour chaque connexion, le mode image de la fibre d'entrée est finement déplacé devant la fibre de sortie en exploitant l'adressage quasi-périodique. On peut ainsi compenser les erreurs de positionnement des fibres dans la matrice, qui peuvent atteindre $2 \mu\text{m}$ dans chaque direction. Les pertes d'insertion mesurées sur les 19 fibres sont de 13,1 dB à température ambiante, et de 11,6 dB en chauffant la cellule à une température de 50°C . Une fonction d'atténuation optique variable à haute résolution (0,05 dB) a également été introduite et testée avec succès, encore par micro-déplacement du faisceau aiguillé autour de la fibre de sortie.

4.5 Conclusions et perspectives

Dans ce chapitre, nous avons pu mettre en œuvre les concepts développés au cours de nos recherches en matière d'interconnexions optiques reconfigurables pour intégrer un prototype d'aiguillage optique bidimensionnel, menant à une capacité potentielle supérieure à 100 fibres. Le principal résultat est l'optimisation conjointe d'une matrice de fibres optiques bi-dimensionnelle et d'un défecteur holographique bi-dimensionnel en technologie FLCOS, menant à un prototype d'aiguillage disposant de 64 voies potentielles. A cette occasion, le concept de déflexion digitale par adressage de réseaux quasi-périodiques a été vérifié et exploité expérimentalement pour optimiser finement les pertes d'insertion de fibre-à-fibre. Nous avons également montré, par une collaboration avec un fabricant de modulateurs FLCOS, que ce composant pouvait être configuré pour une utilisation transparente aux débits en vigueur sur les transmissions WDM. La conception et l'intégration de matrices de fibres bi-dimensionnelles en topologie irrégulière fut pour nous un défi technologique, dans la mesure où aucun fournisseur n'était en mesure de satisfaire notre cahier des charges. Une fois encore, nous avons choisi de nous lancer dans l'intégration et la conception du composant, guidés par notre expérience propre et celle des personnes qui ont gravité autour des études. Outre l'implication des thésards sur les deux phases du projet (C. Uche et C. Letort), je soulignerai les supports techniques déterminants de P. Chanclou (France Telecom R&D) pour la conception du porte-fibres et de mon collègue B. Vinouze, pour l'intégration de la matrice de fibres.

Quelle était alors la nouvelle étape ? Plusieurs voies d'investigations s'offraient à nous. La plus évidente était de creuser l'étude des fonctionnalités de sélectivité en longueur d'onde, sachant que la granularité de bande avait été progressivement supplantée par la granularité "canal", à l'image du fonctionnement d'un WSS. Force était de constater que notre architecture n'était pas adaptée à une telle modification de cahier des charges. Dans le même temps, les avancées technologiques concernant les WSS avaient conduit à des composants commer-

ciaux intégrés et performants. Sur la base de l'architecture de la figure 3.2, la déflexion dans le plan spectral était effectuée au moyen de micro-miroirs (MEMS) [85], puis par affichage de HDR sur un modulateur LCOS à cristal liquide nématique [86]. Cette dernière solution fut développée par la société Australienne Engana, rachetée par Optium, à son tour acquise par Finisair, qui commercialise actuellement les dispositifs⁷ les plus performants. Dans le même temps, la conjoncture défavorable dans le domaine des télécoms avait tari les sources de financement et de partenariat sur ce type de problématique.

Nous nous sommes alors concentrés sur un problème assez mal connu à l'époque : la modélisation des performances de ces dispositifs de commutation et d'aiguillage optique dans le cadre des réseaux optiques. Nous en exposons une synthèse au chapitre suivant.

⁷appelés WAVESHAPERS et présentés comme des "façonneurs" de micro-faisceau dans le domaine spectral et spatial... ce qu'ils font réellement.

Chapitre 5. *Modélisation et simulation de nœuds de routage de canaux optiques*

Au cours de mes travaux sur l'aiguillage optique, j'avais été amené à me poser la question de la transparence optique des dispositifs étudiés (section 3.1.1, p. 39). Les mesures dynamiques effectuées dans le cadre du contrat CRISTO avaient permis de mettre en évidence l'inocuité apparente de nos dispositifs, par une mesure locale des pertes d'insertion et de TEB. Ce n'est toutefois que la vision de notre modeste rôle de "composantier". Du point de vue du "systèmeur" ou encore de l'opérateur de réseau, le problème est plus général et concerne la transparence optique de tous les composants situés sur le trajet du signal, à l'échelle d'un lien de transmission, puis du réseau entier. Nous n'avons pu réellement nous attaquer à cette problématique qu'au contact d'acteurs majeurs du domaine. Les deux collaborations marquantes furent les suivantes :

- Au début des années 2000, la société SAGEM était un des leaders sur le marché Français dans la vente d'équipements de transmission SDH de faible et moyenne capacité. Leur produit phare était le multiplexeur à insertion-extraction ADR2500. Soucieux de s'engager sur le marché des équipements "tout-optiques" qui pointaient leur nez sur les anneaux métropolitains WDM, l'industriel était soucieux de choisir le bon compromis performances/coût parmi les architectures et les technologies de nœuds d'insertion-extraction optiques OADM¹. Suite à un premier contact, nous leur avons proposé d'aborder le problème via la simulation et le prototypage virtuel, que nous étions en train de mettre en place pour simuler les dispositifs d'aiguillage et de commutation optique, via le simulateur de transmission optique VPI Transmission Maker (VPITM). La discussion a débouché sur une collaboration via une thèse financée par contrat CIFRE, menée par Jérémie Jauffrit. Nous fournissons les principaux résultats en 5.1.
- Le projet RYTHME², déjà évoqué dans ce mémoire, avait pour objectif de réduire la complexité et le coût des réseaux de transport opaques, basés sur une régénération électronique systématique (SDH), en définissant la notion de réseau Hybride, ou partiellement transparent [59]. Une fonction décrivant la qualité de transmission optique, dite "QoT³", avait été définie par Alcatel-Lucent, l'un des partenaires du projet [23]. Schématiquement la QoT est définie comme une fonction de quatre paramètres phy-

¹que l'on peut voir comme des brasseurs optiques à deux entrées et deux sorties

²2004-2006, labellisé par le RNRT

³Quality of Transmission.

siques fondamentaux : Rapport signal sur bruit optique (OSNR), dispersion chromatique cumulée (DC), dispersion modale de polarisation (PMD) et phase non-linéaire (ϕ_{NL}). A partir de ces quatre paramètres, il est possible d'estimer la dégradation d'un signal optique lors de son parcours le long d'une connexion. La difficulté consiste ensuite à lier le TEB (via le facteur Q) à la QoT, et cet exercice combinant mathématiques aléatoires et mesures expérimentales fut l'un des moments forts de RYTHME. Une fois la QoT validée, on peut s'en servir comme outil de base pour le dimensionnement des zones de transparence (optique) du réseau, via un algorithme d'assignation de longueurs d'ondes. Cette dernière tâche fut conduite par M. Gagnaire et N. Puech, de Telecom ParisTech, en collaboration étroite avec les équipes d'Alcatel et de France Telecom, partenaires du projet. Les paramètres de QoT n'étant au départ modélisés que sur les liens de transmission, il restait à voir comment ils étaient modifiés à la traversée des nœuds de routage optique (brasseurs, OADM) du réseau. Devant la complexité de tels dispositifs, nous avons proposé de les assembler et de les caractériser à partir de modèles virtuels créés sous le simulateur VPITM. Ce fut le point de départ de notre implication dans RYTHME, via la thèse de Frédéric Lecoche, financée par le projet.

Cette thématique a également été le cadre d'échanges fructueux avec des spécialistes de la simulation photonique dans le cadre du réseau d'excellence Européen "e-Photon-ONE". A cette occasion, j'ai eu le plaisir d'organiser à Brest le Workshop Européen STREON (Simulation Tools for Research and Education in Optical Networks). La manifestation s'est tenue en octobre 2005 et a réuni une centaine de scientifiques et d'industriels dans le domaine des modèles, méthodes et outils de simulation en transmission optique.

5.1 Modélisation et simulation d'anneaux optiques métropolitains

Le cahier des charges proposé par la SAGEM consistait en la construction et la simulation d'une architecture d'anneau WDM flexible, afin de satisfaire une montée graduelle des débits transportés. Les points à prendre en compte étaient les suivants :

- Périmètre de l'anneau fibré : 200 km
- Nombre typique de nœuds (multiplexeurs à insertion/extraction optique) : 8
- Nombre de longueurs d'onde maximal : 32
- Espacement du peigne WDM : 100 Ghz dans la bande C
- Débit d'un canal optique : 2,5 et 10 Gbit/s
- Sécurisation : protection optique de type 1+1 ou 1:1
- Flexibilité de connexion : possibilité d'établir une connexion entre nœuds au niveau λ sans intervention sur site distant et sans perturbation des connexions existantes
- Ajout ou suppression de nœud : doit se faire sans perturber les connexions déjà en place

La figure 5.1 fournit un schéma de la topologie physique (les fibres) et la topologie logique (l'ensemble des connexions possibles) d'un tel réseau. La topologie est entièrement maillée, c'est-à-dire qu'il existe toujours une connexion entre deux nœuds quelconques de l'anneau. Ces dernières s'effectuant à une longueur d'onde donnée, chaque nœud devra intégrer trois fonctions bien déterminées :

1. une *extraction* de l'anneau des longueurs d'ondes qui proviennent des autres nœuds,

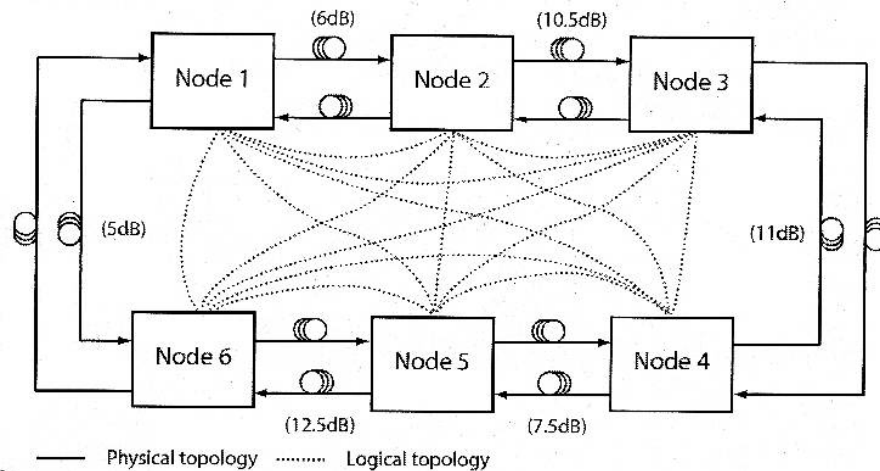


FIG. 5.1 – Modèle d'étude : anneau WDM à six nœuds et deux fibres contra-propagatives. Les valeurs indiquées sur chaque liaison sont les atténuations linéiques dues à la propagation dans la fibre.

2. une *insertion* des longueurs d'ondes que le nœud émet dans l'anneau à destination des autres nœuds,
3. une amplification, pour compenser les pertes de propagation dans la fibre entre deux nœuds.

Pour répondre au cahier des charges, nous avons choisi une structure commune à tous les nœuds du réseau, excepté le nœud central (ou Hub) qui fait office de passerelle entre l'anneau et le réseau dorsal. L'idée consiste à faire en sorte que la puissance des canaux optiques à l'entrée des nœuds soit la même pour tous, dans la limite du budget en puissance optique. Ce principe avait été suggérée par Michel Morvan, expert en transmission optique au sein de notre département, qui avait rejoint le projet SAGEM en cours de route. Pour la mise en œuvre, le contrainte du coût était primordiale pour notre partenaire. Après calcul analytique des bilans de puissance et d'OSNR⁴ pour plusieurs architectures, l'implantation optique retenue pour le nœud est schématisée sur la figure 5.2. Les canaux optiques sont extraits en entrée de nœud et les nouveaux sont insérés dans la foulée, puis amplifiés et adaptés en puissance au tronçon de fibre suivant par l'atténuateur optique variable (VOA). L'étape suivante consiste alors à calculer les paramètres des composants constitutifs pour un fonctionnement optimal de toutes les connexions de l'anneau. L'outil utilisé pour cette phase de prototypage est le simulateur de transmission optique VPITM, réalisé et distribué par la société Virtual Photonics⁵. La structure logicielle de l'outil est complexe et fait intervenir (i) des modèles de composants, (ii) un moteur de simulation et (iii) une interface graphique. Le choix des modèles de simulation est ici primordial. A l'issue de longues investigations sur les composants et leur description logicielle au cours de la thèse de J. Jauffrit, trois niveaux de modélisation ont été définis, illustrés sur la figure 5.3 dans le cas d'un filtre optique :

- Le modèle *idéal* : représentation élémentaire d'un composant. Les paramètres sont ré-

⁴Optical Signal-to-Noise Ratio

⁵www.virtualphotonics.com

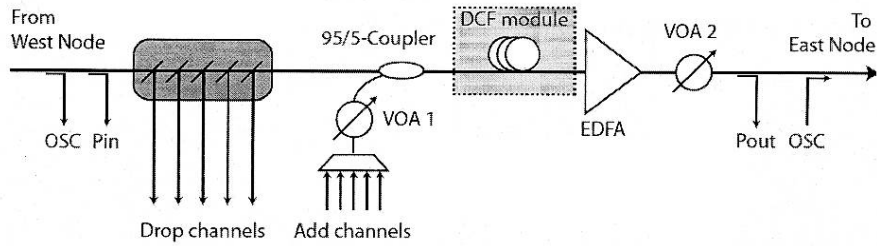


FIG. 5.2 – Extraction (Drop) \mapsto Insertion (Add) \mapsto Amplification (EDFA) : structure physique générique retenue pour implanter un nœud de la figure 5.1. Seules cinq longueurs d'ondes sont représentées dans cette configuration. VOA : atténuateur optique variable, OSC : canal optique de supervision, DCF : module de compensation de dispersion chromatique.

duits au minimum et les caractéristiques sont limitées à des gabarits idéaux. Dans le cas d'un filtre optique, on se limite aux pertes d'insertion et à la bande-passante.

- Le modèle *réaliste* : le nombre de paramètres représentatifs du composant est accru et les caractéristiques sont décrites par des fonctions mathématiques ou des équations d'évolution décrivant les mécanismes physiques mis en jeu. Dans le cas d'un laser à semi-conducteur, le logiciel VPI propose le modèle "LaserRateEq", source optique virtuelle intégrant les équations d'évolution de la densité de porteurs et de photons dans la cavité. Il s'agit d'une représentation très complète de la réalité physique. Dans l'exemple du filtre optique, on peut approcher la fonction de transfert par un développement de Bessel ou un gabarit Gaussien, avec un taux de réjection limité des canaux voisins.
- Le modèle *exact* : c'est le modèle physique par excellence intégrant, outre la précision de description du modèle précédent, des mesures expérimentales effectuées sur des composants réels. Il est donc possible de corriger les défauts du modèle réaliste et les écarts entre les spécifications du constructeur et les performances du composant utilisé sur le banc. Ce dernier point peut être intégré de manière statistique par le logiciel.

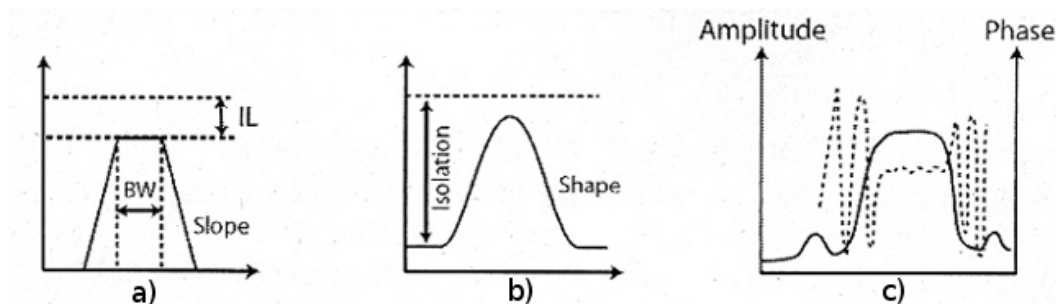


FIG. 5.3 – Différents niveaux de description du gabarit d'un filtre optique : (a) modèle idéal trapézoïdal avec niveau d'isolation infinie (IL : insertion loss, BW : bandwidth) – (b) modèle réaliste avec taux d'isolation fini – (c) modèle exact d'après mesures expérimentales, en amplitude et en phase.

Le modèle de nœud générique (fig. 5.2) a été assemblé en combinant les modèles réalistes disponibles dans le simulateur et en extrayant le plus de modèles exacts possible par mesure expérimentale. Ce fut les cas des modules d'extraction, dont la fonction de transfert mesurée en amplitude et en phase (délai de groupe) est fournie sur la figure 5.4.a. Les filtres sont ensuite assemblés dans le simulateur pour fournir une voie d'extraction de longueur d'onde (fig. 5.4.b). La simulation globale de l'anneau à six nœuds de la figure 5.1 a été réalisée en

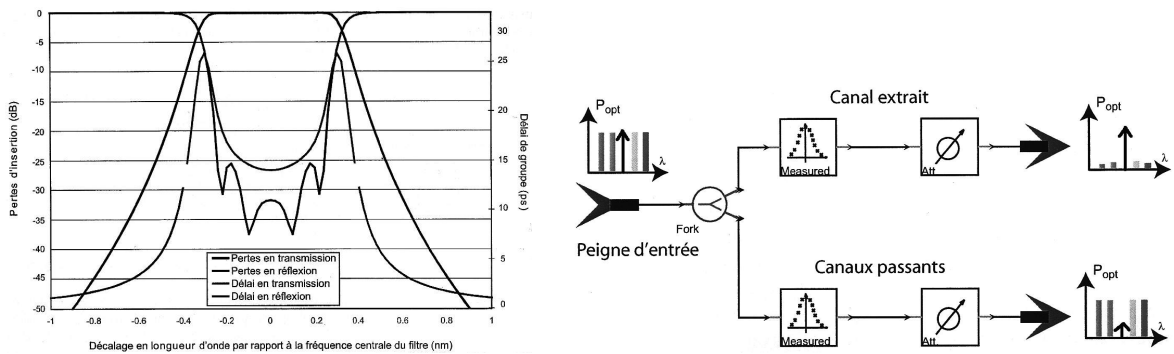


FIG. 5.4 – (gauche) Résultat de mesure de la fonction de transfert normalisée d'un filtre optique diélectrique en amplitude et en phase et (droite) modèle de filtre d'extraction à deux ports élaboré à partir de mesures sur filtre réel (modèle exact).

allouant une longueur d'onde pour chaque connexion de nœud à nœud. La même longueur d'onde est utilisée dans les deux sens de transmission. Des analyseurs de spectre optique virtuels permettent de visualiser l'état du spectre WDM en différents points du réseau. Les connexions ont été caractérisées à partir du nœud 1. Des récepteurs (modèles réalistes) couplés à des estimateurs de TEB à chaque nœud ont permis de mesurer la qualité des transmissions simulées, à 2,5 puis à 10 Gbit/s. Pour le débit de 2,5 Gbit/s la figure 5.5.a montre

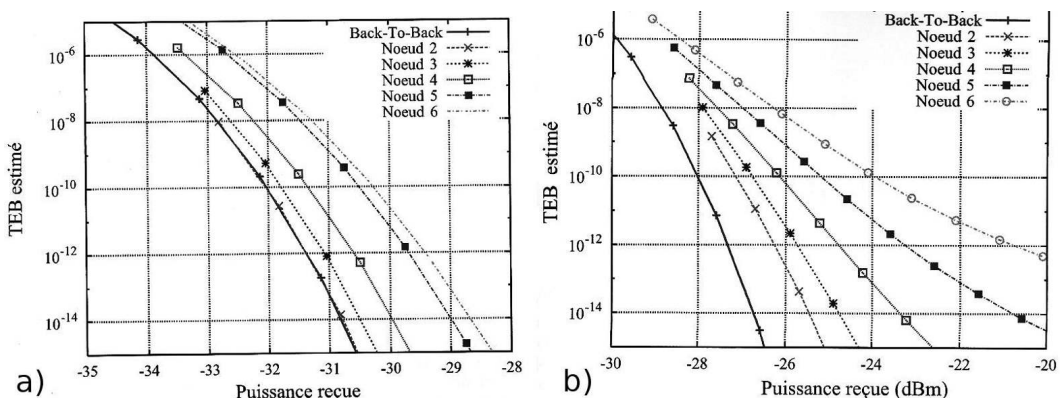


FIG. 5.5 – Courbes de sensibilité obtenues lors d'une connexion optique émise par le nœud 1, à destination de chacun des 5 autres nœuds du réseau, pour un débit de 2,5 Gbit/s (gauche) et 10 Gbit/s (droite).

une courbe de pénalité maximale de 1,8 dB pour la liaison du nœud 1 vers le nœud 6. En

passant à 10 Gbit/s, nous avons du prendre en compte les effets non-linéaires dans le modèle de fibre optique et inclure le module de compensation de dispersion chromatique. La figure 5.5.b montre une pénalité maximale simulée de 4 dB pour la liaison du nœud 1 vers le nœud 6, réduisant la marge en puissance de réception par rapport au système opérant à 2,5 Gbit/s. Ces résultats sont primordiaux pour le dimensionnement physique du réseau. Le simulateur peut alors prendre en compte un changement de topologie de l'anneau ou la modification d'un ou plusieurs composants –sans coût financier supplémentaire– en rendant compte de la modification des performances des connexions. On peut alors parler de prototypage virtuel, comme nous l'avons développé dans la référence [21].

5.2 Modélisation et simulation de nœuds de brassage optique

Fort de notre expérience acquise sur les travaux précédents, nous sommes attelés à la modélisation logicielle des nœuds de brassage optique. Comme précisé précédemment, le cadre de l'étude était le projet RYTHME. Ce travail fut conduit par Frédéric Lecoche [87], avec le support initial de Jérémie Jauffrit. Nous résumons le travail réalisé sur la simulation de nœuds à modules intégrés, utilisant des commutateurs sélectifs en longueur d'onde comme brique de base (fig. 3.1.b, page 39). Comme il n'existait pas de modèle de WSS dans la bibliothèque du simulateur, nous avons choisi de modéliser ces derniers par des modèles exacts. La tâche est incomparablement plus complexe que pour les filtres optiques de la section 5.1. Pour un WSS comportant F ports de sortie et L longueurs d'onde par fibre d'entrée, il faut en effet mesurer FL fonctions de transfert de filtrage optique. Deux campagnes de mesure ont été menées en parallèle, l'une avec Alcatel (dans le cadre du projet RYTHME) et l'autre en partenariat avec les plates-formes d'étude Bretonnes PERSYST⁶ et PERDYN⁷. Seule la deuxième campagne de mesure a fourni des résultats exploitables. Les deux WSS mesurés étaient commercialisés par la société METCONNEX et comportaient 9 ports de sortie, opérant sur 40 longueurs d'onde de la grille ITU standard (0,8 nm, soit 100 GHz @ 1550 nm). La figure 5.7 fournit le résultat de mesure d'une série de canaux commutés par le WSS. L'enseignement principal est la dispersion des performances du composant sur l'ensemble de ses sorties, ainsi que la dispersion des courbes mesurées entre les deux WSS. Cette campagne de mesure vient donc renforcer l'intérêt de l'approche par modèle exact. Précisons également que le fonctionnement du WSS en mode "atténuation", indispensable pour gérer les fluctuations de puissance dans le multiplex WDM, va générer des fluctuations du gabarit de filtrage. En pratique, ce comportement devra être intégré au la construction du modèle virtuel exact de WSS, qui tend à devenir volumineux. Si l'on veut prendre les effets de polarisation en compte (PMD et PDL), nous avons montré qu'il faut assembler dans le simulateur un nombre de composants virtuels égal à :

$$N_{\text{comp}} = 7A \cdot FL + 4L + F + 3$$

où A est le nombre de niveaux d'atténuation en puissance imposés par le WSS sur ses sorties. Si $A = 5$, nous obtenons plus de 10 000 composants à assembler, comme l'illustre le schéma

⁶Plate-forme d'études et de recherche sur les SYStèmes de Télécommunications, sise à l'ENSSAT de Lannion

⁷Plate-forme d'études et de recherche sur les Fonctions Dynamiques en optoélectronique, partenariat entre Telecom Bretagne et l'ENI de Brest.

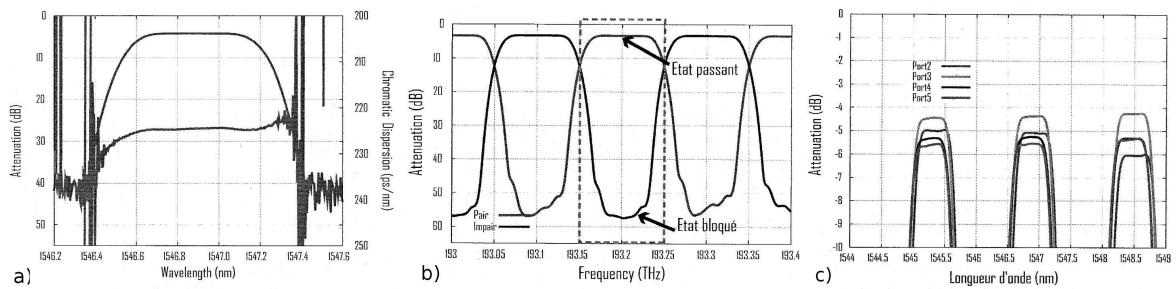


FIG. 5.6 – Modèle générique d'un WSS représenté par des modèles exacts de composants (a) fonction de filtrage d'un canal individuel (amplitude et phase)– (b) fonction de filtrage fréquentiel alterné sur deux voies. On constate que les états "passant" et "bloqués" ne sont pas équivalents – (c) résultat du filtrage alterné sur 4 voies différentes : les pertes d'insertion ne sont pas uniformes.

de la figure 5.7, tiré de [87]. Afin de faciliter l'assemblage logiciel de telles structures, nous avons développé les procédures en langage de programmation TCL⁸, interprété par le simulateur VPI. Ce travail fastidieux a été supervisé par F. Lecoche, et mobilisé plusieurs projets d'étudiants de Télécom Bretagne. Il s'est basé sur l'étude antérieure réalisée par A. Kali au cours de sa thèse [88], axée sur les matrices de commutation optique. La couche graphique de TCL (TK) facilite le chargement des composants, la saisie de leurs paramètres et ceux du WSS, ainsi que les nombreuses liaisons à établir entre les modules. La figure 5.8 donne une idée de la fenêtre de paramétrisation d'un WSS, pour $F = 5$ et $L = 8$. Un travail identique a été réalisé pour la modélisation et l'assemblage de matrices de commutation spatiale, intervenant dans les brasseurs optiques selon la structure NMD (figure 3.1.a, page 39) La figure 5.9 fournit deux courbes de caractérisation des performances dynamiques d'une matrice de commutation (au niveau réaliste) et d'un WSS (modèle exact) virtuels. Là encore, le simulateur permet d'obtenir une multitude de renseignements, par variation automatique de paramètres bien précis. On peut encore parler ici de prototypage virtuel.

5.3 Conclusion et perspectives

Les modèles de simulation et les primitives d'assemblages automatisés développés dans ce chapitre ont permis de représenter des dispositifs complexes d'extraction et de commutation de longueur d'onde au sein d'un simulateur de transmission optique faisant office de référence dans le domaine (VPITM). L'étude concernant le dimensionnement de l'anneau optique WDM est allée jusqu'à son terme, le simulateur fournissant les caractéristiques des liaisons (TEB) pour une large gamme de paramètres concernant les composants et les dispositifs. Même si elle ne fournit pas d'ingénierie "automatique" du réseau, la méthode proposée peut être vue comme un outil d'aide à la décision dans le prototypage de l'anneau, économisant temps et argent pour l'industriel soucieux de s'impliquer dans la conceptions d'architectures optiquement transparentes, sans choix préconçu de telle ou telle technologie. La passage à la simulation des nœuds de brassage a conduit à la validation des modules virtuels de WSS et de matrices de commutation. La dernière étape aurait consisté à les as-

⁸Tool Command Language

sembler pour réaliser le prototypage virtuel du nœud complet, en version NMD ou NMI. A ce stade, nous avons été limités par la taille de la mémoire vive de notre ordinateur, bornée à 4 Go en architecture 32 bits, alors que les ressources nécessaires pour caractériser un nœud de capacité moyenne sont de l'ordre de 10 Go. Ce volume est dû en partie au grand nombre de bits (au moins 10000) et à la forte fréquence d'échantillonnage nécessaires pour estimer le TEB avec une bonne précision. La première alternative aurait consisté à limiter la capacité du nœud à quelques voies (peu d'intérêt), la seconde à migrer sur des ordinateurs en architecture 64 bits, configuration non supportée par VPI à l'époque. Bien que cette dernière étape n'ait pu être entreprise lors de l'étude, les travaux de simulation nous avaient permis de simuler de manière extrêmement précise le phénomène de diaphonie dans les matrices de commutation et les WSS [87]. Dans la mesure où la thématique n'est pas épuisée et sachant que la dernière version de VPITM peut exploiter des structures en 64 bits, nous projetons de reprendre prochainement cette étude avec une architecture matérielle et logicielle de simulation adaptée.

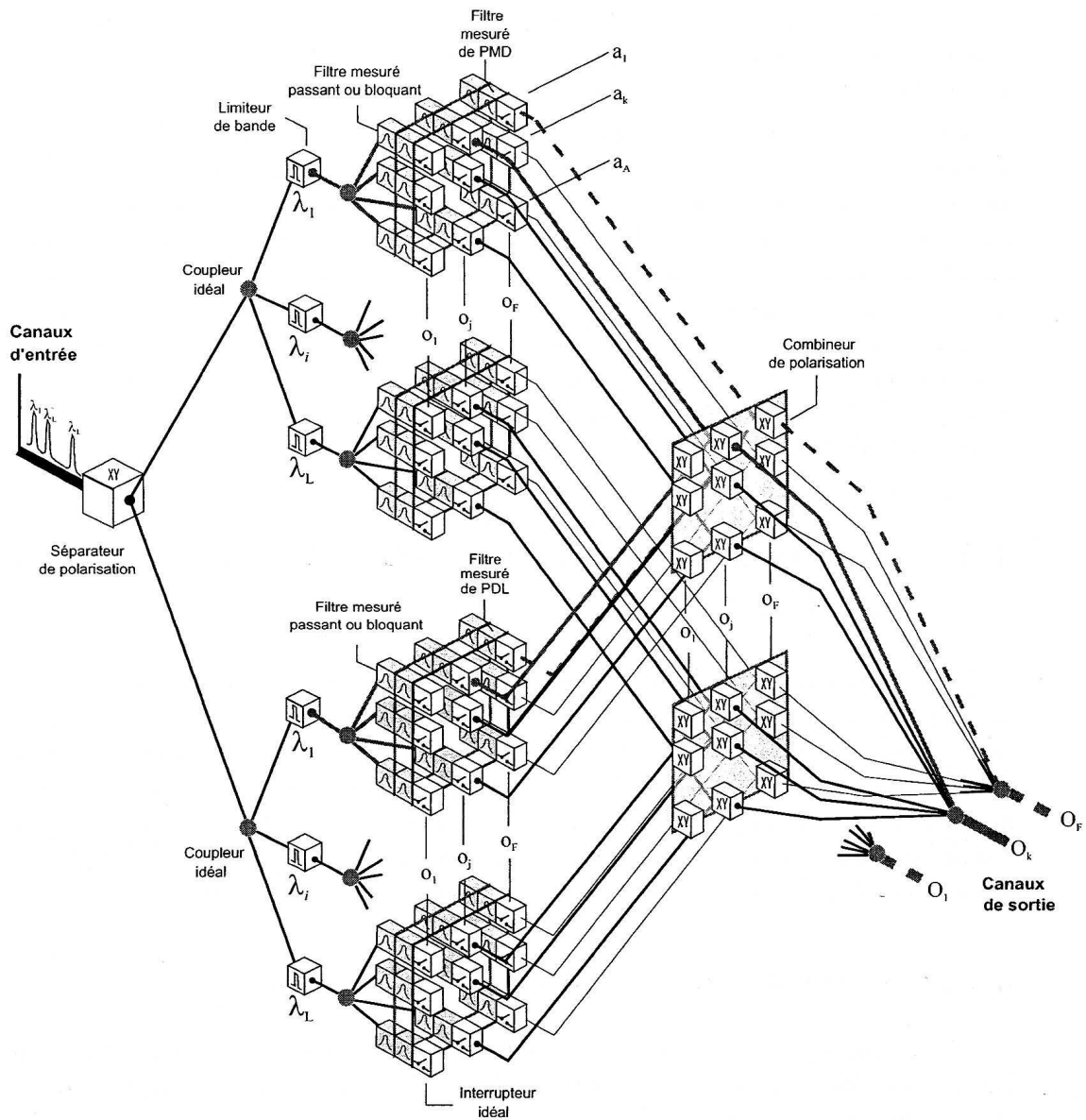


FIG. 5.7 – Schéma global d'un modèle exact de WSS. Principe général : le signal optique d'entrée est divisé vers la banque de filtres mesurés, chaque étage traduisant un phénomène physique bien précis. Les signaux sont alors recouplés vers la sortie désirée, par choix du bon interrupteur.

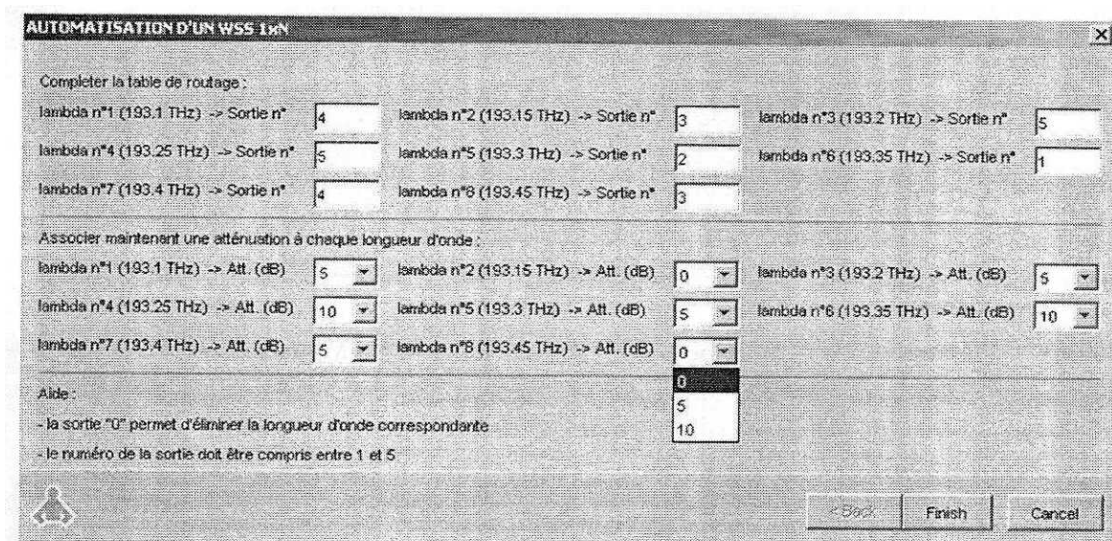


FIG. 5.8 – Interface de saisie de la table de routage d'un WSS.

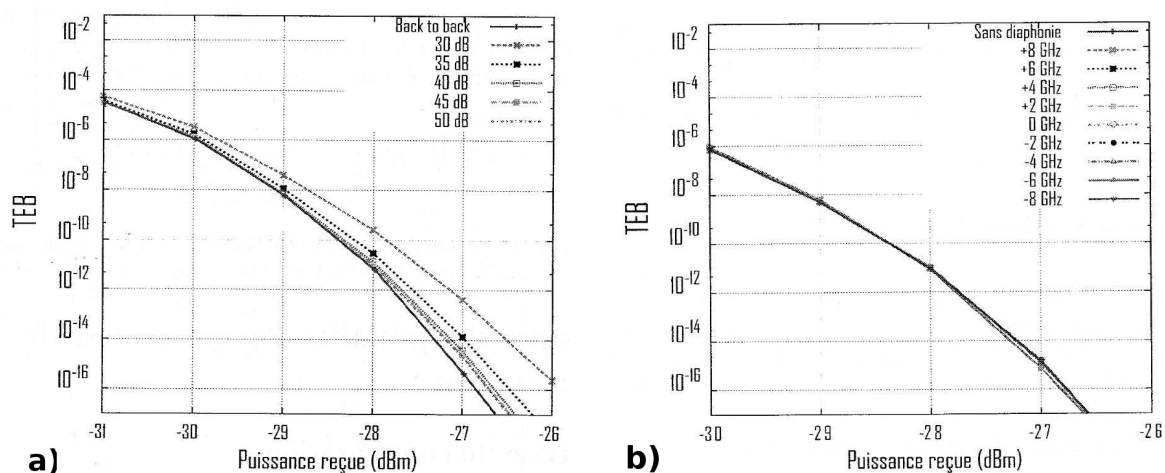


FIG. 5.9 – (a) courbe de TEB relevé sur la sortie commutée d'une matrice 16×16 pour différents niveaux de diaphonie ($OSNR = 30$ dB) – (b) Courbe de TEB mesurée en sortie d'un WSS 1×6 , en fonction du désalignement du laser d'émission, pour un débit de 10 Gbit/s et un espacement inter-canal de 50 GHz.

Chapitre 6. *Nouveaux axes de recherche*

Un nouveau champ d'investigations a émergé en 2008, sur une thématique liée à la conception des réseaux domestiques du futur. La problématique initiale est la satisfaction des trois demandes a priori antagonistes des nouveaux cyber-consommateurs que sont le très haut-débit, le "sans-fil" et le respect de l'environnement et des normes sanitaires. Concernant le dernier point, force est de constater que la multiplication anarchique des équipements multimédia au sein des foyers conduit à une augmentation significative de la consommation d'énergie. Ces préoccupations environnementales se heurtent à une demande sans cesse croissante de la part des opérateurs et des industriels de promouvoir le haut débit dans le réseau local domestique (RLD) avec une offre de services de plus en plus diversifiée. Cette demande est forte, sous la pression conjuguée de l'introduction du réseau d'accès optique¹ chez l'abonné et de la prolifération de sources et de récepteurs multimédia en haute-définition dans l'habitat. Dans ce dernier cas, une contrainte de mobilité des liaisons apparaît rapidement pour éviter des coûts d'interfaçage et de câblage prohibitifs. Pour preuve de l'activité dans ce domaine, on peut citer des initiatives récentes visant à redéfinir le RLD dans un contexte à très haut débit : d'une part les projets Européen ALPHA [89], traitant de la convergence fixe-mobile dans le RLD et le réseau d'accès, et OMEGA [90], visant à développer un RLD fournissant des services sans-fil à 1 Gbit/s, ou encore le projet TECHIM@GES [91], du Pôle de compétitivité "Images et Réseau", ayant pour objectif d'évaluer les différentes technologies innovantes pour le RLD, en particulier sur canal optique. Dans tous les cas, l'optique sans fil est considérée comme le recours ultime dès lors que les débits visés dépassent plusieurs Gbit/s. Le seul problème est que la plupart des architectures actuelles utilisent des liaisons diffuses, limitées en débit par les trajets multiples. Pour dépasser cette limitation, il faut recourir à des liaisons optiques en ligne directe (LOS²), plus délicates à mettre en place car impliquant des schémas dynamiques via plusieurs émetteurs et un suivi géométrique des récepteurs.

C'est dans ce cadre et en raison de notre vécu dans le domaine de l'optique en espace libre que nous avons été sollicités par nos collègues du département "signal et images", déjà impliqués dans des projets concernant les liaisons optiques sans-fil.

Après étude plus précise de la problématique et de l'état de l'art, nous avons participé à un appel à projet de l'Institut Telecom (thématique "Futur et rupture"), et déposé une proposition intitulée GROWTH³, acceptée et labellisée en mai 2009. Le financement permet notamment d'accompagner la thèse de doctorat de Hani AL HAJJAR. Par rapport à l'état de l'art en transmission Radiofréquence (RF), notre étude vise à caractériser et évaluer une

¹FTTH, entre autres, fournissant des débits symétriques de 100 Mbit/s, voire au-delà.

²Line of sight

³Green Optical Wireless inTo Home network

technologie "tout-optique" fournissant des cellules optiques à très haut débit (e.g. 10 Gbit/s) via un réseau d'interconnexion en fibre optique polymère (POF). Dans un premier temps, cette dernière est préférée à la fibre optique silice pour ses propriétés mécaniques et sa facilité d'installation en environnement domestique. Au niveau d'un bâtiment, chaque pièce est équipée de plusieurs bornes "optiques sans fil" (OSF), permettant de maintenir par diversité spatiale une qualité de liaison suffisante avec les terminaux mobiles en présence d'obstacles ou d'affaiblissements trop importants. Chaque borne est alimentée par un tronçon de POF dédié. Placée a priori dans un coin supérieur de la pièce et arrosant une zone déterminée de celle-ci, la borne OSF présente une grande simplicité. Elle ne comporte aucune interface électrique (plus énergivore, a priori) et se contente de diffuser le signal optique issu de la POF dans l'espace libre, en adaptant l'étendue géométrique du faisceau aux contraintes du bilan de liaison. On se situe donc en rupture par rapport à une solution de type Radio-sur-fibre, qui nécessite des interfaces Optique-Radio-Optique en chaque point. Outre l'absence de rayonnement RF des liaisons OSF, on vise une réduction de la consommation énergétique et du coût global du système par diminution du nombre et de la complexité des interfaces et des bornes. Compte tenu des affaiblissements typiques des liaisons OSF en mode LOS, on considèrera des cellules d'une portée moyenne de 4m et d'une surface au sol inférieure au m^2 . Les bornes OSF peuvent être déportées à loisir dans le bâtiment, grâce à la faible atténuation des nouvelles générations de POF [92].

Pour satisfaire des critères de sécurité oculaire et de qualité spectrale des sources optiques, la longueur d'onde utilisée de bout en bout est de 1550 nm (laser à semi-conducteur). Le dimensionnement du réseau passe par la caractérisation physique du canal de transmission optique fibre/espace libre et le choix d'un type de transmission adapté (e.g. format de modulation et protocoles de communication). Nous avons étudié jusqu'ici la propagation des cellules optiques dans une fibre optique polymère à gradient d'indice perfluorée (PF-GI-POF) et effectué des caractérisations spatio-temporelles des cellules émises vers l'espace libre. Un point délicat sera ensuite la gestion du bilan de liaison en espace libre, handicapé par les pertes importantes issues de la propagation et la faible sensibilité des photo-récepteurs à ces débits. Nous étudions pour ce faire des scénarii mettant en jeu des déflecteurs optiques à l'émission et des concentrateurs optiques à la réception. C'est en quelque sorte un retour aux sources de l'aiguillage optique, mais sur une échelle spatiale beaucoup plus importante.

Parallèlement à l'ingénierie de transmission de la liaison mixte "fibre + OSL", confiée à H. Al Hajjar, nous étudions l'aspect énergétique de ces réseaux sans-fil à haut débit, en remettant à plat l'ensemble des technologies disponibles, qu'elles soient RF ou optiques. Cette étude est menée conjointement avec le département Micro-Ondes de Telecom Bretagne, dans le cadre de la plate-forme technologique "CapilR"⁴. De ce point de vue, nous nous focalisons sur l'apport des architectures sans-fil dites "pico-cellulaires" et aux mécanismes mis en jeu dans toutes les couches du réseau pour diminuer l'émission et la consommation énergétique. Ce sujet d'investigation a été confié en Septembre 2009 à Yves JOSSE, dans le cadre de sa thèse.

⁴Implantée à Télécom Bretagne, dans le but est de concevoir les technologies optiques et radiofréquences capables d'offrir une technologie à haut-débit dans des zones particulièrement fréquentées

Chapitre 7. *Conclusion générale*

Au terme de la rédaction de ce manuscrit, un bilan objectif des activités présentées s'impose. J'espère avoir démontré, à travers les développements exposés, mon attachement à traiter **toutes** les composantes de la démarche scientifique dans ce cadre passionnant qu'est la recherche appliquée : (i) la théorie et la modélisation, (ii) la démarche expérimentale, (iii) l'encadrement des travaux de thèse et d'équipes de collaborateurs, (iv) la diffusion du savoir (publications, conférences) et l'action internationale et (v) la valorisation via les collaborations industrielles.

Je n'ai pas détaillé ma très forte implication dans l'enseignement et la formation. Ce n'était pas l'objet de cette partie et une liste de mes activités dans ce domaine est fournie en partie II. Je soulignerai simplement que cette activité très chronophage a peut-être, à certaines occasions, ralenti mon rendement de chercheur. Ceci explique, en partie, la rédaction relativement tardive de ce document dans mon cursus. C'est un choix personnel et je l'assume entièrement, à l'image des nombreux collègues ayant fait le choix inverse.

Mes actions de recherche, initialement orientées vers les interconnexions tridimensionnelles entre plan de données bidimensionnelles, portées par des modèles d'entrées/sorties optiques plutôt abstraits, se sont progressivement orientées vers les connexions reconfigurables entre fibres monomodes. L'application, bien définie par le cadre des différents contrats qui se sont enchaînés, n'a cessé de se préciser autour de la notion d'aiguilleur optique, transformé en "couteau-suisse" de la commutation spatiale grâce à la sélectivité spatiale et spectrale naturelle de la diffraction. Nous avons ainsi démontré assez tôt (dès 1999), tant conceptuellement qu'expérimentalement, la validité des fonctionnalités d'aiguillage mono- et multi-voie à temps de configuration rapide ($< 1\text{ms}$), de translation de bande de fréquences ou d'atténuation optique variable, unifiées dans un dispositif unique par l'utilisation de la déflexion holographique dynamique reconfigurable sur FLC. Bien qu'il n'y ait pas eu de relation de cause à effet, ces travaux précédèrent la mise au point des WSS que nous connaissons actuellement, à fonctionnalité et degré de complexité d'un autre ordre de grandeur, il est vrai.

Ces travaux avaient débuté par le paradigme du RIPN, censé modéliser à l'époque une grande variété de problèmes liés au calcul optique intensif. Les retombées furent beaucoup plus modestes, car la révolution du calcul optique n'a pas eu lieu, par la perte de vitesse des architectures neuronales (mode ?) et sous les assauts répétés des niveaux de densité atteints en intégration électronique. Le bénéfice de notre étude fut toutefois d'enranger l'expérience nécessaire dans le domaine du calcul de HSO et du traitement optique de l'information pour aborder sereinement le volet de la connectique transparente entre fibres optiques.

En termes de perspectives scientifiques, nous souhaitons tout d'abord nous inscrire dans la continuité de nos thématiques actuelles depuis 2008. L'étude des réseaux optiques sans fil revêt en effet une importance capitale, tant au niveau académique, nécessitant une approche architecturale innovante et la mise au point de nouveaux composants d'émission et de réception, qu'au niveau des conséquences sociétales et environnementales liées aux usages et services offerts par le très haut débit domestique. Il s'agit là d'une thématique riche dans laquelle nous souhaitons nous impliquer dans la durée.

Par ailleurs, il reste bien des points à explorer sur des aspects non-aboutis ou des voies parallèles aux points évoqués dans ce manuscrit. J'en citerai seulement trois, pouvant à l'occasion faire l'objet d'un travail de thèse :

- l'optique adaptative dynamique et plus généralement diffractante et reconfigurable, via les perspectives ouvertes par les techniques actuelles en optique diffractante et les nouvelles générations de modulateurs LCOS, à forte définition, résolution et efficacité. D'un point de vue académique, l'étude du modèle de la déflexion d'un faisceau propageant des impulsions courtes ultra-courtes (la ps) balaye toute une gamme d'applications, que ce soit en télécoms (commutation de circuits optiques à 100 Gbit/s et au-delà) ou en bio-photonique;
- les méthodes d'imagerie dans les milieux complexes tels que les tissus diffusants, nécessitant la mise en œuvre de primitives parallèles impliquant des MSL et un traitement massif de l'information acquise;
- la modélisation et la simulation de la diaphonie dans les architectures de nœuds optiques, toujours d'actualité et accessible via les nouvelles architectures matérielles et logicielles de calcul désormais disponibles;

Bibliographie

- [1] P. Chavel, S. Laval, and J. Taboury. "L'optique dans l'ordinateur". *Revue de Physique Appliquée*, 22: 1215–1219, 1987.
- [2] R.M. Haralick and L. Shapiro. "The consistent labelling problem : part 1". *IEEE Trans. Patt. Anal. Machine Intell.*, PAMI-1(2): 173–184, 1979.
- [3] B. Fracasso, J.-L. de Bougrenet de la Tocnaye, C. Maissiat, and P. Ambs. "optical implementation of inference machine using a binary multilayer interconnection network". *Proc. Conf. on Optical Computing, Garmisch-Partenkirchen*, SPIE1319: pp. 164–165, 1990.
- [4] B. Fracasso, J.-L. de Bougrenet de la Tocnaye, and P. Ambs. "recording reconfigurable binary computer-generated holograms on bistable optically addressed ferroelectric liquid crystal spatial light modulator". *Optics Letters*, 15(24): pp. 1473–1475, 1990.
- [5] J. Primot, L. Sogno, B. Fracasso, and K.Heggarty. "wavefront sensor prototype for industrial applications based on a three-level phase grating". *Optical Engineering*, 36(3): pp. 901–904, 1997.
- [6] A. Kohler, B. Fracasso, P. Ambs, and J.-L. de Bougrenet de la Tocnaye. "joint transform correlator using a nonlinear ferroelectric spatial light modulator". *Proc. Conf. On Optical Applied Science and Engineering, San Diego*, SPIE1564: pp. 236–243, 1991.
- [7] K. Yao, P. Galerne, J. Michel, and B. Fracasso. "optical contour enhancement using a modified gradient filter". *Proc. conf. on optical information processing*, SPIE 2540: 277–279 (à vérifier), 1995.
- [8] J. Primot, K. Heggarty, and B. Fracasso. "réseau de diffraction à trois niveaux de phase pour l'interférométrie". *International symposium Optronics and Defence, Montigny-le-Bretonneux*, 3-5 déc.1996.
- [9] B. Fracasso, N. Nochez, M. Desmons, and F. Ghorbel. "an iterative approach to geometric transformations with diffractive optics". *Optics communications*, 133(3): pp. 355–364, 1997.
- [10] P. Berthelé, B. Fracasso, and J.-L. de Bougrenet de la Tocnaye. "efficient beam-steering in the 1.55 micron window using a large-tilt flc one-dimensional array". *Proc. 6th intern. Conf. On Ferroelectric Liquid Crystals (FLC'97), Brest, 10-24th July 1997*, pages 142–143.
- [11] P. Berthelé, B. Fracasso, and J.-L. de Bougrenet de la Tocnaye. "design and characterization of a liquid-crystal spatial light modulator for a polarization-insensitive optical space switch". *Applied Optics*, 37(23): pp. 5461–5468, 1998.
- [12] P. Berthelé, B. Fracasso, and J.-L. de Bougrenet de la Tocnaye. "efficient beam steering in the 1.55 micron window using large-tilt flc one-dimensional array". *Ferroelectrics*, 214: pp. 117–124, 1998.
- [13] B. Fracasso, J.L. de Bougrenet de la Tocnaye, and P. Gravey. "free-space optical switching and routing function for dense WDM networks". *Symposium on Photonics in Communications and sensing, Kista, Sweden, 14-15 Oct. 1999*.

- [14] B. Fracasso, L. Noirie, J-L. de Bougrenet de la Tocnaye, M. Razzak, and E. Daniel. "performance assessment of a liquid crystal multichannel photonic space-switch". *Proc. Photonics in Switching '01 (Technical Digest), Monterrey, 11-15 Juin 2001*, pages 24–26.
- [15] C. Letort, M. Razzak, B. Fracasso, and K. Heggarty. "dynamic spectral response of a liquid crystal based optical channel selector". *Proc. Photonics in Switching '03 (Technical Digest)*, pp. 259-261, *Versailles, 28 Sept - 2 Oct. 2003*, pages 259–261.
- [16] B. Fracasso, J.L. de Bougrenet de la Tocnaye, M. Razzak, and C. Uche. "design and performance of a versatile holographic liquid crystal wavelength selective switch". *IEEE Journal of Lightwave Technology*, 21(10): pp. 2405–2411, 2003.
- [17] K. Heggarty, B. Fracasso, C. Letort, J.-L. de Bougrenet de la Tocnaye, M. Birch, and D. Krüerke. "silicon backplane ferroelectric liquid crystal spatial light modulator for uses within an optical telecommunication environment". *Ferroelectrics*, 312: pp. 39–55, 2004.
- [18] K. Heggarty, B. Fracasso, J.-L. de Bougrenet de la Tocnaye, M. Birch, and D. Krüerke. "silicon backplane ferroelectric liquid crystal slm for uses within an optical telecommunication environment". *Proc. 9th intern. Conf. On Ferroelectric Liquid Crystals FLC'03*.
- [19] C. Letort and B. Fracasso. "two-dimensional fibre array design and characterisation for holographic wavelength-selective switches". *Proceedings ECOC 2006, Cannes, vol. 3*, pages 193–194, 2006.
- [20] C. Letort, B. Vinouze, and B. Fracasso. "design and fabrication of a high-density 2d fiber array for holographic switching applications". *Optical Engineering*, 47(4): pp. 50–58, 2008.
- [21] J. Jauffrit, B. Fracasso, M. Morvan, and D. Betoule. "performance evaluation of a WDM metropolitan network : a virtual prototyping approach". *Annals of Telecommunications*, 6(5-6): pp. 604–617, 2006.
- [22] F. Lecoche, B. Fracasso, and A. Kali. Modélisation et simulation des performances des nœuds de routage optique dans les réseaux dorsaux hybrides. *Actes du Séminaire GIS-FOTON "Systèmes de transmissions à haut-débit", Plestin-les-Grèves, 26-27 Novembre 2004*, pages 50–53.
- [23] T. Zami, J.C. Antona, P. Peloso, E. Le Rouzic, A. Morea, M. Joindot, B. Fracasso, P. Gravey, and M. Gagnaire. "dimensioning of WDM transparent networks based on the quality of transmission". *Proc. Conference Broadband Europe, 8-10 Dec. 2004, Brugge, Belgium*.
- [24] J.H. Collet, W. Hlayhel, and D. Litaize. "Parallel optical interconnects may reduce the communication bottleneck in symmetric multiprocessor computers". *Applied Optics*, 40(20):3371–3378, 2001.
- [25] F. T. S. Yu. "Optical information processing". *Ed. Wiley, New-York*, 1983.
- [26] D. J. JACKSON. "Photonic processors : a system approach". *Applied Optics*, 33(23):5451–5465, 1994.
- [27] H.J. Caulfield, J. Kinser, and S. K. Rogers. "Optical neural networks". *Proceedings of the IEEE*, 77:1573–1582, 1989.
- [28] J. W. Goodman, F. J. Leonberger, S. Kung, and R. A. Athale. "Optical interconnections for VLSI systems". *Proceedings of the IEEE*, 72:850–865, 1984.
- [29] P. M. Duffieux. "L'intégrale de fourier et ses applications à l'optique". *Faculté de sciences, Besançon*, 1946.
- [30] A. Maréchal and P. Croce. "Un filtre des fréquences spatiales pour l'amélioration du contraste des images optiques". *Compte-rendu de l'Académie des Sciences*, 127:607–615, 1953.

- [31] A. B. Vander Lugt. "Signal detection by complex spatial filtering". *IEEE Transactions on Information Theory*, 10(2):139–145, 1964.
- [32] G. Bonnet. "Introduction à l'optique métaxiale. première partie : diffraction métaxiale dans un espace homogène. trilogie structurale, dioptré sphérique.". *Annales des Télécommunications*, 33(5-6):143–165, 1978.
- [33] J. W. Goodman. "Introduction to Fourier optics". *Ed. MacGraw-Hill*, 1968.
- [34] Pierre Pellat-Finet. "Optique de fourier – théorie métaxiale et fractionnaire". *Ed. Springer*, 2009, 2009.
- [35] D. Gabor. "Light and information". *Progress in Optics*, *Ed. E. Wolf, North-Holland*, 1:109–153, 1961.
- [36] E. H. Linfoot. "Information theory and optical images". *Journal of Optical Society of America*, 45(10):808–819, 1955.
- [37] H. M Ozaktas and J. W. Goodman. "Lower bound for the communication volume required for an optically interconnected array of points". *Journal of Optical Society of America A*, 7(11):2100–2106, 1990.
- [38] P. J. Van Heerden. "Theory of optical information storage in solids". *Applied Optics*, 2(4):393–400, 1963.
- [39] H. Lee, X.G. Gu, and D. Psaltis. "Volume holographic interconnections with maximal capacity and minimal crosstalk". *Journal of Applied Physics*, 65(6):2191–2198, 1989.
- [40] B. K. Jenkins, P. Chavel, R. Forchheimer, A. A. Sawchuk, and T. C. Strand. "Architectural implications of a digital optical processor". *Applied Optics*, 23(19):3465–3474, 1984.
- [41] D. Psaltis, D. J. Brady, and K. Wagner. "Adaptive optical networks using photorefractive crystals". *Applied Optics*, 27(9):1752–1759, 1988.
- [42] H. Damman and K. Görtler. "High efficiency in-line multiple imaging by means of multiple phase hologram". *Optics Communications*, 3(4): 312–315, 1971.
- [43] R. O. Duda and P. E. Hart. "Use of the Hough transformation to detect lines and curves in pictures". *Communications of the ACM*, 15(1):11–15, 1972.
- [44] O. Bryngdahl. "Optical geometric transformations". *Journal of Optical Society of America*, 64: 1092, 1974.
- [45] M. Born and E. Wolf. "Principle of optics : electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light (7th edition)". *Ed. Cambridge University Press*, 1999.
- [46] P. Ambs, Sing H. Lee, Q. Tian, and Y. Fainman. "Optical implementation of the Hough transform by a matrix of holograms". *Applied Optics*, 25(22):4039–4045, 1986.
- [47] R. W. Gerchberg and W. O. Saxton. "A practical algorithm for the determination of the phase from image and diffraction plane pictures". *Optik*, 35:237–246, 1972.
- [48] R.W. Floyd and L. Steinberg. "an adaptive algorithm for spatial grey scale". *Proceedings of the Society of Information Display*, 17:75–77, 1976.
- [49] D. Slepian and H.O. Pollack. "Prolate spheroidal wave functions, Fourier analysis, and uncertainty - I.". *Bell System Technical Journal*, 40: 43–63, 1961.
- [50] H. Hamam, B. Fracasso, and J.-L. de Bougrenet de la Tocnaye. "node-based reconfigurable volume interconnections. part 2 : holographic encoding". *Applied Optics*, 33(23): pp. 5372–5381, 1994.
- [51] H.J. Caulfield. "Optical inference machines". *Optics communications*, 55(4):259–260, 1985.

- [52] D. Psaltis and N. Fahrat. "Optical information processing based on an associative memory model of neural nets with thresholding and feedback". *Optics Letters*, 10(2):98–100, 1985.
- [53] Y. C. Lee, G. Doolen, H. H. Chen, G. Z. Sun, T. Maxwell, H. Y. Lee, and C. L. Giles. "Machine learning using a higher order correlation network". *Physica D*, 22(2):276–279, 1986.
- [54] C. L. Giles and T. Maxwell. "Learning, invariance, and generalization in high-order neural networks". *Applied Optics*, 26(23):4972–4978, 1987.
- [55] B. Fracasso and J.-L. de Bougrenet de la Tocnaye. "node-based reconfigurable volume interconnections. part 1 : principles and optical implementation". *Applied Optics*, 33(23): pp. 5348–5362, 1994.
- [56] N. A. Clark and S. T. Lagerwall. "submicrosecond bistable electro-optic switching in liquid crystals". *Applied Physics Letters*, 36(11):899–901, 1980.
- [57] A.W. Lohmann. "Binary fraunhofer holograms, generated by computers". *Applied Optics*, 6(10):1739–1748, 1967.
- [58] M. A. Seldowitz, J. P. Allebach, and D. W. Sweeney. "synthesis of digital holograms by direct binary search". *Applied Optics*, 28:2788–2798, 1987.
- [59] T. Zami, J.C. Antona, B. Fracasso, E. Le Rouzic, A. Morea, H. Nakajima, P. Gravey, and M. Gagnaire. Définition des scenarios de réseaux hybrides, rapport du projet RYTHME (rnrt), vol. 1.1a. *Rapport du Projet RYTHME, vol 1.1A*, pages 1–16, Juin 2004.
- [60] P. Gravey, E. Le Rouzic, T. Zami, and B. Fracasso. Nœuds de routage hybride : architectures et technologies. *Rapport du Projet RYTHME, vol 1.1B*, pages 1–40, Juin 2004.
- [61] J.S. Patel and Y. Silberberg. "Liquid-crystal and grating-based multiple wavelength cross-connect switch". *IEEE Photonics Technology Letters*, 7(5):514–516, 1995.
- [62] L. Noirie, B. Fracasso, P. Gravey, S. Gosselin, A. Lelah, T. Kretz, and F. Boubal. Synthèse annuelle no 1. *Rapport du Projet CRISTO, vol. 3*, pages 1–22, Juin 2000.
- [63] Y.A. Peter, F. Gonté, H.P. Herzig, and R. Dändliker. "Micro-optical switch for a large number of optical interconnects using a deformable mirror". *IEEE Photonics Technology Letters*, 14(3):301–303, 2002.
- [64] Y.A. Peter, F. Gonté, H.P. Herzig, and R. Dändliker. "Holographic-switching between single-mode fibres based on electrically addressed nematic liquid crystal gratings with high deflection accuracy". *Optics Communications*, 160(1-3):42–46, 1999.
- [65] D.T. Neilson and al. "256x256 port optical cross-connect system". *IEEE Journal of Lightwave Technology*, 22(6):1499–1505, 2004.
- [66] Cédric Letort. "Modélisation, implantation et caractérisation de fonctions de routage tridimensionnel de canaux optiques pour les réseaux WDM". *Thèse de Doctorat, Université de Rennes I*, Juin 2007.
- [67] Patrick Berthelé. "Etude, réalisation et caractérisation d'un modulateur spatial de lumière à cristal liquide ferroélectrique pour la commutation spatial entre fibres optiques monomodes". *Thèse de Doctorat, Université de Bretagne Occidentale*, février 1998.
- [68] W. A. Crossland et al. "Beam steering optical switches using LCOS : the ROSES demonstrator". *Inst. Elect. Eng. Electronics Communications Meeting, London, U.K, March 17th*, page ???, 2000.
- [69] J.W. Goodman and A. Silvestri. "some effects of Fourier domain phase quantization". *IBM Journal of research and development*, 14:478–484, 1970.

- [70] L.Y Yin et al. "MEMS for optical networking: Current status and future prospects". *Proc. ECOC*, pages pp. 91–?, 2000.
- [71] I. Underwood, D.G. Vass, and R.M. Sillito. "Evaluation of an nMOS VLSI array for an adaptive liquid-crystal spatial light modulator". *IEEE Proceedings*, 133: 77–82, 1986.
- [72] K.M. Johnson, D.J. Mc Knight, and I. Underwood. "Smart spatial light modulators using liquid crystal on silicon". *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 29(2): 699–714, 1993.
- [73] J. Chen, W. Weingarter, A. Azarov, and R. Giles. "Tilt-angle stabilization of electrostatically actuated micromechanical mirrors beyond the pull-in point". *IEEE Journ. Micromech. Syst.*, 13(6): 988–997, 2004.
- [74] T. Fujita, K. Maenaka, and Y. Takayama. "Dual-axis MEMS mirror for large deflection angle using su-8 soft torsion beam". *Sensors and Actuators*, 121: 16–21, 2004.
- [75] J. Singh, T. Gan, M. Mohanaj, and S. Liw. "3D free-space thermally actuated micromirror device". *Sensors and Actuators*, 123: 468–475, 2005.
- [76] R.B. Meyer, L. Liebert, L. Strzelecki, and P. Keller. "ferroelectric liquid crystals". *Journal de Physique Lettres*, 36(3):69–71, 1975.
- [77] K. Yoshino, M. Ozaki, A. Tagawa, T. Hatai, K. Asada, Y. Sadohara, K. Daido, and Y. Ohmori. "Electro-Optic switching in polymer waveguide using surface stabilized ferroelectric liquid crystal". *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 202:163–169, 1991.
- [78] S. Warr and R. Mears. "Polarisation insensitive operation of ferroelectric liquid crystal crossbar devices". *Electronic Letters*, 31(9):714–716, 1995.
- [79] M. L. Doucen and P. Pellat-Finet. "Polarization properties and diffraction efficiencies of binary anisotropic gratings : general study and experiments on ferroelectric liquid crystals". *Optics Communications*, 151(4): 321–330, 1998.
- [80] Mustapha Razzak. "Commutateur, optique 3d à cristal liquide ferroélectrique pour le routage de canaux optiques WDM". *Thèse de Doctorat, Université de Rennes I*, Juillet 2003.
- [81] J.-L. de Bougrenet de la Tocnaye, B. Fracasso, and M. Razzak. Optical filter device employing a programmable diffractive element and the corresponding spatial spectral band-router and chromatic dispersion compensation device. *Brevet WO-2003091755, PCT FR2003001292*, Publié le 06/11/2003.
- [82] Chidi Uche. "Development of high capacity and low crosstalk 2-d holographic switches for deployment in optical transport networks". *Thèse de Doctorat, University of Cambridge*, Avril 2003.
- [83] Antoine Tan. "Etude et réalisation de commutateurs optiques à base de défecteurs à cristaux liquides nématiques". *Thèse de Doctorat, Université de Bretagne Occidentale*, Juin 2002.
- [84] P. Gravey, J.L. de Bougrenet de la Tocnaye, B. Fracasso, N. Wolffer, A. Tan, B. Vinouze, M. Razzak, and A. Kali. "liquid-crystal based optical space-switches for DWDM networks". *Annals of Telecommunications*, 58(9-10): pp. 1378–1400, 2003.
- [85] T. Ducellier et al. "novel high-performance hybrid waveguide-mems 1×9 wavelength selective switch in a 32-cascade lopp experiment". *Proc. ECOC*, 2004.
- [86] G. Baxter et al. "highly programmable wavelength-selective switch based on liquid-crystal on silicon switching elements". *Proc. OFC/NFOEC*, pages 66–67, 2006.
- [87] Frédéric Lecoche. "Modélisation et simulation de nœuds de routage optique dans les réseaux dorsaux hybrides". *Thèse de Doctorat, Université Bretagne Sud.*, Janvier 2008.

- [88] Amal Kali. "Etude des performances et des fonctionnalités des matrices de commutation pour le brassage optique". *Thèse de Doctorat, Université de Rennes I*, Mai 2004.
- [89] M. Popov. On beyond HDTV, ICT ALPHA and convergence. In *Networking and Optical Communication conference (NOC 2008), Krems, Austria, July 1-4, 2008*, 2008.
- [90] J.-P. Javaudin, M. Bellec, D. Varoutas, and V. Suraci. OMEGA ICT project: Towards convergent gigabit home networks. In *Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2008. PIMRC 2008. IEEE 19th International Symposium on*, pages 1–5, 2008.
- [91] O. Bouchet, M. El Tabach, M. Wolf, D.C. O'Brien, G.E. Faulkner, J.W. Walewski, S. Randel, M. Franke, S. Nerreter, K.-D. Langer, J. Grubor, and T. Kamalakis. Hybrid wireless optics (HWO): building the next-generation home network. In *Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing, 2008. CNSDSP 2008. 6th International Symposium on*, pages 283–287, 2008.
- [92] I. Mollers, D. Jager, R. Gaudino, A. Nocivelli, H. Kragl, O. Ziemann, N. Weber, T. Koonen, C. Lezzi, A. Bluschke, and S. Randel. Plastic optical fiber technology for reliable home networking: overview and results of the EU project pof-all. *Communications Magazine, IEEE*, 47(8):58–68, 2009.

Deuxième partie

Parcours personnel

• Etat Civil de Bruno Fracasso

- Né le 11 juin 1965 à Roanne (Loire)
- Nationalité Française
- Marié, quatre enfants (trois filles, un garçon)
- *Adresse professionnelle* : Telecom Bretagne, Département d'Optique, CS 83818, 29238 Brest Cedex 3
- *Adresse personnelle* : Langoulouman, 29810 Plouarzel
- *Téléphone* : +33 (0)2 29 00 14 20 (bureau), +33 (0)6 81 43 53 74 (mobile)
- *Courriel* : bruno.fracasso@telecom-bretagne.eu

• Parcours professionnel

- 1994-2010** Enseignant-chercheur (Maître de Conférences) à l'Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications de Bretagne, Institut Telecom.
- 2002** Ingénieur de Recherche à la société OPTOGONE/MEMSCAP.
- 1993-94** Ingénieur de Recherche au département Mathématiques et Systèmes de Communications de l'Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications de Bretagne.
- 1990-93** Allocataire de recherche à la DRET (Direction des Recherches et Etudes Techniques).
- 1989** Enseignant du contingent en cycle d'ingénieur à l'ECOLE NAVALE (Service National).

• Formation

- 1993** Doctorat de l'Université de Haute-Alsace, spécialité Electronique et Automatique, Mulhouse.
- 1989** DEA en Electronique et Hyperfréquences de l'Université de Bretagne Occidentale, Brest.
- 1989** Ingénieur diplômé de l'Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications de Bretagne, Brest (option Hyperfréquences et Optique)
- 1983** Baccalauréat, Série C (mention Bien), Académie de Lyon

• Divers

- 2008** Chevalier de l'ordre des Palmes Académiques.

• Activités de recherche

Thématiques

- 1990-1997** Travaux de recherche sur l'holographie synthétique et les interconnexions optiques en espace libre : 1 thèse de doctorat soutenue et 10 publications et communications. Mise en place et co-responsabilité d'un laboratoire de conception et de réalisation de micro-optiques diffractives au département d'Optique de Telecom Bretagne.
- 1997-2008** Travaux de recherche sur la commutation optique spatiale en espace libre : 25 publications et communications. Encadrement de 4 thèses de doctorat dans le domaine des architectures et dispositifs de commutation pour les réseaux optiques (P. Berthélé, C. Uche, M. Razzak et C. Letort).
- 2002-2008** Travaux de recherche sur la modélisation et simulation de dispositifs de routage optique pour les transmissions sur fibre à très haut débit. Encadrement de 2 thèses de doctorat dans le domaine de la simulation des dispositifs pour la gestion des réseaux de transmission optique (J. Jauffrit et F. Lecoche).
- 2008-2010** Travaux de recherche sur les réseaux sans fil à haut débit. Encadrement de 2 thèses de doctorat ... (H. Al Hajjar et Y. Josse).

Encadrement doctoral

- P. BERTHELÉ *Etude et caractérisation d'un modulateur spatial de lumière à cristal liquide ferroélectrique pour la commutation spatiale entre fibres optiques monomodes*, Université de Bretagne Occidentale, thèse soutenue le 27 février 1998 (taux d'encadrement : 100 %)
- C. UCHE *Development of high-capacity and low-crosstalk holographic switches for deployment in optical transport networks*, Université de Cambridge, thèse soutenue le 1er Avril 2003 (taux d'encadrement : 50 %)
- M. RAZZAK *Commutateurs Optiques 3D à cristal liquide ferroélectrique pour le routage de canaux optiques WDM*, Université de Rennes I, thèse soutenue le 1er Juillet 2003 (taux d'encadrement : 100 %)
- J. JAUFFRIT *Modélisation et simulation d'anneaux optiques métropolitains flexibles utilisant le multiplexage en longueur d'onde*, Université de Rennes I, thèse soutenue le 19 Décembre 2006 (taux d'encadrement : 50 %)
- C. LETORT *Modélisation, implantation et caractérisation de fonctions de routage tri-dimensionnel de canaux optiques pour les réseaux WDM*, Université de Rennes I, thèse soutenue le 11 Juin 2007 (taux d'encadrement : 100 %)
- F. LECOCHÉ *Modélisation et simulation de nœuds de routage optique dans les réseaux dorsaux hybrides*, Université de Bretagne Sud, thèse soutenue le 11 Janvier 2008 (taux d'encadrement : 100 %)

- H. AL HAJJAR *Modélisation et simulation de nœuds de routage optique dans les réseaux dorsaux hybrides*, Université de Bretagne Sud, thèse en cours (taux d'encadrement : 50 %)
- Y. JOSSE *Modélisation et simulation de nœuds de routage optique dans les réseaux dorsaux hybrides*, Université de Bretagne Sud, thèse en cours (taux d'encadrement : 100 %)

Contrats de recherche et collaborations

- 1996-1999** Responsable du contrat de recherche GISOO/France Telecom/Telecom Bretagne portant sur l'aiguillage optique à cristaux liquides.
- 1999-2002** Suivi du contrat CRISTO (labellisé RNRT, Réseau National de Recherche en Télécommunications) entre ALCATEL, France Télécom et Telecom Bretagne portant sur la commutation optique monodimensionnelle à cristaux liquides.
- 1999-2002** En charge du projet de recherche entre Telecom Bretagne et l'Université de Cambridge, Département d'ingénierie électrique, sur le développement et le test de modulateurs spatiaux de lumière à cristal liquide ferroélectrique pour la commutation optique.
- 2001-2002** En charge du transfert de la technologie Aiguilleur optique du département d'optique de Telecom Bretagne au département Recherche et Développement de la société OPTOGONE/MEMSCAP.
- 2001-2002** Gestion du contrat entre OPTOGONE et la société CRLOPTO (Edinburgh) pour la fourniture de micro-modulateurs à cristal liquide ferroélectrique.
- 2001-03** Gestion du contrat entre OPTOGONE et la société PHSMEMS (Grenoble) pour la fourniture de matrices de fibres optiques bidimensionnelles.
- 2003-2006** Gestion du volet "nœuds de routage optique" du contrat RYTHME (labellisé RNRT) entre ALCATEL, France Télécom, TELECOM Paris, OPTOGONE et Telecom Bretagne, portant sur le dimensionnement des réseaux de transport optique hybrides.
- 2004-2007** Activités au sein du réseau d'excellence Européen "ePhoton One", regroupant 40 Universités et Ecole sur le thème de l'Optique dans les réseaux du futur. Participation aux réunions plénières et réunions de divers groupes de travail. Aide à la mise en place de collaborations et de mobilité entre les établissements du consortium.
- 2007-2010** Activités au sein du réseau d'Excellence Européen "Bone" - Implication dans les groupes de réflexion portant sur l'enseignement des réseaux optiques et les réseaux domestiques à haut débit.
- 2009-2010** Responsable du projet GROWTH , "futur et ruptures" de l'Institut Telecom.

Manifestations et comités

- Co-organisateur de la conférence internationale FLC'97, portant sur les cristaux liquides ferroélectriques (Brest, 1997).

- Président du comité d'organisation et membre du comité scientifique du symposium Européen STREON'05, portant sur les outils de simulation pour la recherche et l'enseignement des réseaux optiques (Brest, 2005).
- Membre du comité scientifique et responsable de la thématique "Optique" des ateliers scientifiques TAIMA'07, portant sur le traitement du signal et des images (Tunis, 2007).
- Co-organisateur de l'école d'été internationale "ePhotonOne" sur le thème des concepts avancés pour les communications optiques (Brest, 2007).
- Membre du comité scientifique des ateliers scientifiques TAIMA'09, portant sur le traitement du signal et des images (Tunis, 2009)

● Liste des publications

Revue internationale à comité de lecture

- [1] B. Fracasso, J.-L. de Bougrenet de la Tocnaye and P. Ambs, "Recording reconfigurable binary computer-generated holograms on bistable optically addressed ferroelectric liquid crystal spatial light modulator", *Optics Letters*, vol. 15, n°24, pp. 1473-1475 (1990).
- [2] B. Fracasso and J.-L. de Bougrenet de la Tocnaye, "Node-based reconfigurable volume interconnections. Part 1 : principles and optical implementation", *Applied Optics*, vol. 33, n°23, pp. 5348-5362 (1994).
- [3] B. Fracasso and J.-L. de Bougrenet de la Tocnaye, "Node-based reconfigurable volume interconnections. Part 2 : holographic encoding", *Applied Optics*, vol. 33, n°23, pp. 5372-5381 (1994).
- [4] B. Fracasso, N. Nochez, M. Desmons and F. Ghorbel, "An iterative approach to geometric transformations with diffractive optics", *Optics communications*, vol. 133, pp. 355-364 (1997).
- [5] J. Primot, L. Sogno, B. Fracasso and K. Heggarty, "Wavefront sensor prototype for industrial applications based on a three-level phase grating", *Optical Engineering*, Vol. 36, pp 901-904 (1997).
- [6] P. Berthelé, B. Fracasso and J.-L. de Bougrenet de la Tocnaye, "Design and characterization of a liquid-crystal spatial light modulator for a polarization-insensitive optical space switch", *Applied Optics*, Vol. 37, pp. 5461-5468 (1998).
- [7] P. Berthelé, B. Fracasso and J.-L. de Bougrenet de la Tocnaye, "Efficient beam steering in the 1.55 micron window using large-tilt FLC one-dimensional array", *Ferroelectrics*, Vol. 214, pp. 117-124 (1998).
- [8] C. Uche, B. Fracasso, W.A. Crossland, J.L. de Bougrenet de la Tocnaye and T.D. Wilkinson, "Development of large capacity and low-crosstalk holographic switches using LCOS Spatial Light Modulators", *Ferroelectrics*, vol. 278, pp. 219-226 (2002).

- [9] B. Fracasso, J.L. de Bougrenet de la Tocnaye, M. Razzak and C. Uche, "Design and performance of a versatile holographic liquid crystal wavelength selective switch", *IEEE Journal of Lightwave Technology*, vol. 21, n° 10, pp. 2405-2411 (2003).
- [10] P. Gravey, J.L. de Bougrenet de la Tocnaye, B. Fracasso, N. Wolffer, A. Tan, B. Vinouze, M. Razzak and A. Kali, "Liquid-crystal based optical space-switches for DWDM networks", *Annals of Telecommunications*, vol. 58, n° 9-10, pp. 1378-1400 (2003)
- [11] K. Heggarty, B. Fracasso C. Letort, J.-L. de Bougrenet de la Tocnaye, M. Birch and D. Krüerke "Silicon backplane ferroelectric liquid crystal spatial light modulator for uses within an optical telecommunication environment", *Ferroelectrics*, vol. 312, pp. 39-55, (2004).
- [12] J. Jauffrit, B. Fracasso, M. Morvan and D. Betoule, "Performance evaluation of a WDM metropolitan network : a virtual prototyping approach", *Annals of Telecommunications*, Vol. 6, n° 5-6, pp. 604-617 (2006).
- [13] C. Letort, B. Vinouze and B. Fracasso, "Design and fabrication of a high-density 2D fiber array for holographic switching applications", *Optical Engineering*, Vol. 47, n° 4, pp 50-58 (2008).

Conférences internationales

- [14] B. Fracasso, J.-L. de Bougrenet de la Tocnaye, C. Maissiat et P. Ambs, "Optical implementation of inference machine using a binary multilayer interconnection network", *Proc. Conf. on Optical Computing*, Garmisch-Partenkirchen, vol. SPIE1319, pp. 164-165 (1990).
- [15] A. Kohler, B. Fracasso, P. Ambs et J.-L. de Bougrenet de la Tocnaye, "Joint transform correlator using a nonlinear ferroelectric spatial light modulator", *Proc. Conf. On Optical Applied Science and Engineering*, San Diego, vol. SPIE1564, pp. 236-243 (1991).
- [16] K. Yao, P. Galerne, J. Michel et B. Fracasso, "Optical contour enhancement using a modified gradient filter", *Proc. conf. on optical information processing*, SPIE 2540, San Diego (1995).
- [17] P. Berthelé, B. Fracasso and J.-L. de Bougrenet de la Tocnaye, "Efficient beam-steering in the 1.55 micron window using a large-tilt FLC one-dimensional array", *Proc. 6th intern. Conf. On Ferroelectric Liquid Crystals (FLC'97)*, Brest, 10-24th July 1997, pp. 142-143.
- [18] B. Fracasso, P. Berthelé, J.L.de Bougrenet de la Tocnaye, "Optimisation of a Reconfigurable Free-Space Fibre Switch in the WDM 1,55  m Window", *Conf. on Lasers and Electro-Optics Europe*, CLEO/Europe, 14-18 Sep 1998.
- [19] K. Heggarty, B. Fracasso, J.-L. de Bougrenet de la Tocnaye, M. Birch and D. Krüerke "Silicon backplane ferroelectric liquid crystal SLM for uses within an optical telecommunication environment", *Proc. 9th intern. Conf. On Ferroelectric Liquid Crystals FLC'03*, Dublin.

- [20] T. Zami, J.C. Antona, P. Peloso, E. Le Rouzic, A. Morea, M. Joindot, B. Fracasso, P. Gravey, M. Gagnaire, "Dimensioning of WDM transparent Networks based on the quality of transmission", *Proc. Conference Broadband Europe*, 8-10 Dec. 2004, Brugge, Belgium.
- [21] C. Letort and B. Fracasso, "Two-dimensional fibre array design and characterisation for holographic wavelength-selective switches", *Proceedings ECOC 2006*, Cannes, vol. 3, pp. 193-194 (2006)

Colloques internationaux

- [22] B. Fracasso, P. Ambs et J.-L. de Bougrenet de la Tocnaye, "Possibilities of space-variant holographic optical elements for implementing multilayer networks", *Proc. third French-German colloquium on holography and its applications*, Saint-Louis (1991).
- [23] J. Primot, K. Heggarty, B. Fracasso, "Réseau de diffraction à trois niveaux de phase pour l'interférométrie", *International symposium Optronics and Defence*, Montigny-le-Bretonneux, France, 3-5 déc.1996.
- [24] B. Fracasso, J.L. de Bougrenet de la Tocnaye and P. Gravey, "Free-space optical switching and routing function for dense WDM networks", *Symposium on Photonics in Communications and sensing*, Kista, Sweden, 14-15 Oct. 1999.
- [25] B. Fracasso, L. Noirie, J.L. de Bougrenet de la Tocnaye, M. Razzak and E. Daniel, "Performance assessment of a liquid crystal multichannel photonic space-switch", *Proc. Photonics in Switching'01 (Technical Digest)*, Monterrey, pp. 24-26, 11-15 Juin 2001.
- [26] C. Letort, M. Razzak, B. Fracasso and K. Heggarty: "Dynamic spectral response of a liquid crystal based optical channel selector", *Proc. Photonics in Switching'03 (Technical Digest)*, pp. 259-261, Versailles, 28 Sept - 2 Oct. 2003.
- [27] J. Jauffrit, D. Betoule, B. Fracasso, M. Morvan, "Performance evaluation of a WDM metropolitan network", *Proc. European Symposium on Simulation Tools for Research and Education for Optical Networks*, STREON'05, pp. 69-72, Brest, 26-27 Oct. 2005.
- [28] S. Rouvrais, A. Picart et B. Fracasso, "Devenir ingénieur par alternance : la situation professionnelle comme catalyseur de l'autonomie et de l'opérationnalité", *actes du colloque "Pédagogies dans l'Enseignement supérieur"*, pp. 555-562, Louvain-La-Neuve, 24-26 janvier 2007.

Communications diverses

- [29] B. Fracasso and J.-L. de Bougrenet de la Tocnaye, "Matrice d'interconnexions en espace libre adressée optiquement", *Actes des journées SFO-SEE sur les fonctions optiques dans l'ordinateur*, Brest, pp. 41-46 (1991).
- [30] B. Fracasso, P. Ambs et J.-L. de Bougrenet de la Tocnaye, "Moteur d'inférence élémentaire basé sur l'utilisation d'une matrice d'interconnexions actives", *Journées thématiques DRET sur le traitement optique du signal*, 6-7 avril 1992, pp. 35-39.

- [31] B. Fracasso, "Commutation spatiale entre fibres monomodes à base d'hologrammes dynamiques sur cristaux liquides ferroélectriques", *Séminaire CNET/GISOO*, Lannion, juin 1999
- [32] J.-P. Laude, B. Fracasso and Ph. Gravey, "Applications of high-capacity optical routers", *Note technique HIGWAVE Optical technologies*, pp. 1-28 (2001)
- [33] B. Fracasso, "Le très-haut débit : vers un réseau internet optique ?", *Colloque Virtua-brest 2002 sur les STIC*, Brest-17-19 janvier 2002.
- [34] F. Lecoche, B. Fracasso, A. Kali, "Modélisation et simulation des performances des nœuds de routage optique dans les réseaux dorsaux hybrides", *Actes du Séminaire GIS-FOTON "Systèmes de transmissions à haut-débit"*, pp. 50-53, Plestin-les-Grèves, 26-27 Novembre 2004.
- [35] C. Letort et B. Fracasso, "Wavelength-band-selective switch based on holographic liquid crystal module", *e-photon/One summer school on Optical Switching Technologies*, Cesenatico (Italie), 30-31 Août 2005.
- [36] F. Lecoche et B. Fracasso, "Optical cross-connecting node description from physical transmission parameters transfer", *e-photon/One summer school on Optical Switching Technologies*, Cesenatico (Italie), 30-31 Août 2005.

Rapports de projets

- [37] S. Gosselin, P. Gravey, A. Lelah, B. Fracasso et F. Boubal, "Dimensionnement des prototypes de commutation", *Rapport du Projet CRISTO (RNRT)*, vol L02, 45 pages, Juillet 1999.
- [38] L. Noirie, B. Fracasso, P. Gravey, S. Gosselin, A. Lelah, T. Kretz et F. Boubal, "Synthèse annuelle n°1", *Rapport du Projet CRISTO (RNRT)*, vol L03, 22 pages, Juin 2000.
- [39] P. Chanclou, B. Fracasso, P. Gravey, N. Wolffer et T. Kretz, "Description des sous-ensembles pour prototypes", *Rapport du Projet CRISTO (RNRT)*, vol L04, 37 pages, Juillet 2000.
- [40] L. Noirie, B. Fracasso, P. Gravey, R. Coquillé, A. Lelah, T. Kretz et S. Louis, "Synthèse annuelle n°2", *Rapport du Projet CRISTO (RNRT)*, vol L07, 24 pages, Avril 2001.
- [41] P. Chanclou, B. Fracasso, P. Gravey, N. Wolffer, "Description des procédures d'assemblage des prototypes", *Rapport du Projet CRISTO (RNRT)*, vol L10, 23 pages, Décembre 2001.
- [42] R. Coquillé, D. Grot, B. Fracasso, A. Kali, A. Tan, et L. Noirie, "Synthèse annuelle n°2", *Rapport du Projet CRISTO (RNRT)*, vol L11, 14 pages, Mars 2002.
- [43] L. Noirie, B. Fracasso, P. Gravey, R. Coquillé, A. Lelah, T. Kretz, "Synthèse finale", *Rapport du Projet CRISTO (RNRT)*, vol L12, 36 pages, Mars 2002.
- [44] T. Zami, J.C. Antona, B. Fracasso, E. Le Rouzic, A. Morea, H. Nakajima, P. Gravey, M. Gagnaire, "Définition des scénarios de réseaux hybrides", *Rapport du Projet RYTHME (RNRT)*, vol 1.1A, 16 pages, Juin 2004.

- [45] P. Gravey, E. LE Rouzic, T. Zami et B. Fracasso, "Nœuds de routage Hybride : architectures et technologie", *Rapport du Projet RYTHME (RNRT)*, vol 1.1B, 40 pages, Juin 2004.
- [46] T. Zami, J.C. Antona, P. Peloso, E. Le Rouzic, A. Morea, I. Joindot, M. Joindot, N. Evanno, J. Poirrier et B. Fracasso, "Définition, mesure et précision du vecteur QoT", *Rapport du Projet RYTHME (RNRT)*, vol 3.1, 56 pages, Octobre 2004.
- [47] T. Zami, J.C. Antona, B. Lavigne, E. Le Rouzic, A. Morea, B. Fracasso, "Mesure expérimentales du vecteur QoT et du facteur Q", *Rapport du Projet RYTHME (RNRT)*, vol 3.4, 34 pages, Juin 2006.
- [48] P. Gravey, F. Lecoche, T. Loukina et B. Fracasso, "Wavelength-Selective Switch exact representation and OPM implementation", *Rapport de Projet Européen E-Photon-One+*, vol. JP-T. D3, 9 pages, Décembre 2007.

Rapports internes

- [49] B. Fracasso and J.-L. de Bougrenet de la Tocnaye, "Active interconnections for multi-layer networks", *rapport du Groupe Optique et Systèmes de Communications (GOSC) de Telecom Bretagne*, 1991, pp. 22-23.
- [50] B. Fracasso, "Node-based reconfigurable three-dimensional interconnections", *rapport du GOSC de Telecom Bretagne*, 1993, pp. 23-24.
- [51] K. Heggarty, B. Fracasso et Y. Defosse, "Diffractive element fabrication facility", *rapport du GOSC de Telecom Bretagne*, 1994, pp. 6-7.
- [52] P. Berthelé et B. Fracasso, "Fixed/reconfigurable hologram associations for a set of reconstructions", *rapport du GOSC de Telecom Bretagne*, 1994, pp 23-24.
- [53] K. Yao, P. Galerne et B. Fracasso, "Optical contour enhancement using a modified gradient operator", *rapport du GOSC de Telecom Bretagne*, 1994, pp 45-46.
- [54] N. Nochez et B. Fracasso, "Iterative approach to diffractive optical geometric transformations", *rapport du GOSC de Telecom Bretagne*, 1995, pp 44-45.
- [55] K. Yao et B. Fracasso, "Optical contour detection with a modified gradient filter : simulations and experimental results", *rapport du GOSC de Telecom Bretagne*, 1995, pp 47-48.
- [56] K. Heggarty, B. Fracasso et J. Primot, "Three phase-levels etched holographic beam splitter", *rapport du GOSC de Telecom Bretagne*, 1996, pp 14-15.
- [57] P. Berthelé et B. Fracasso, "Optical space-switching architectures with programmable planar diffractive elements", *rapport du GOSC de Telecom Bretagne*, 1996, pp 25-26.
- [58] N. Nochez et B. Fracasso, "High-resolution optical interconnects using multifacet weighted holograms", *rapport du GOSC de Telecom Bretagne*, 1996, pp 29-30.

Brevet

- [59] J.-L. de Bougrenet de la Tocnaye, B. Fracasso, M. Razzak, "Optical filter device employing a programmable diffractive element and the corresponding spatial spectral band-router and chromatic dispersion compensation device", Brevet WO-2003091755, PCT FR2003001292, Publié le 06/11/2003.

Thèse de Doctorat

- [60] B. Fracasso, "Interconnexions optiques en espace libre fondés sur le principe d'une architecture à plan de nœuds : théorie et implantation", Université de Haute-Alsace, Juillet 1993.

Chapitre de Livre

- [61] C. Vazquez Garcia, I. Perez Garcilopez, P. Contreras Lallana, B. Vinouze and B. Fracasso, "Liquid crystal optical switches", X. H. Wu Ed., Woodhead Publishing Limited, 2010.

• Activités pédagogiques

▷ **Premier cycle**

Formation d'ingénieur de Telecom Bretagne (1ère année)

- Mathématiques pour l'ingénieur : cours et travaux dirigés (TD) (20h/an, 40 étudiants), depuis 1994.
- Electromagnétisme : cours et TD (20h/an, 130 étudiants), de 1994 à 2002.
- Propagation guidée : cours et TD (26h/an, 40 étudiants), de 2002 à 2003.
- Traitement du signal physique : cours, TD, conception et responsabilité de module (28h/an, 160 étudiants), depuis 2003.

▷ **Deuxième cycle**

Divers

- Master de Physique (M1, UBS) : cours et TD en Réseaux de transmissions optiques (6h/an, 15 étudiants) de 2002 à 2005.
- Master Physique et Photonique pour les Télécoms (M2, ENSSAT/UBS/Telecom Bretagne/ENIB) : responsable et co-concepteur du module d'enseignement "Architectures pour les réseaux de télécoms optiques" (20h/an, 40 étudiants) de 2004 à 2007.
- Master Electronique des Systèmes communicants (M2, UBO) : cours et TD sur les Réseaux d'accès optiques (12h/an, 15 étudiants) depuis 2006.
- Master Photonique et traitement de l'information (M2, ENSSAT/UBS/Telecom Bretagne/ENIB) : concepteur du module, cours, TD et TP sur les fonctions optiques dynamiques (21h/an, 15 étudiants) depuis 2007.
- Master of Science (MsC) Optical Telecommunications de Telecom Bretagne : cours et TD sur le sujet Optical transmission networks (8h/an, 12 étudiants) de 2002 à 2004.

Formation d'ingénieur de Telecom Bretagne (2ème année)

- Réseaux de transmission optique : cours et TD (9h/an, 12 étudiants), de 1996 à 2001
- Composants optiques pour la transmission : cours et TD (12h/an, 30 étudiants), depuis 2003.
- Systèmes de transmission : TD (8h/an, 35 étudiants), depuis 2003.

Formation d'ingénieur de Telecom Bretagne (3ème année)

- Concepts avancés pour les réseaux optiques : responsable et concepteur du module d'enseignement, cours et TD, (20h/an, 15 étudiants) de 1996 à 2003.
- Conception Matérielle des Systèmes : responsable de la voie d'approfondissement, cours, TD et TP (120h/an, 35 étudiants), de 1997 à 2000.
- De la transmission optique aux réseaux optiques : concepteur et responsable du module d'enseignement, cours, TD et TP (25h/an, 40 étudiants) de 2004 à 2007.
- Laboratoire virtuel de transmission optique : responsable et concepteur du module d'enseignement, (20h/an, 40 étudiants) depuis 2004.

Formation d'ingénieur de Telecom Lille 1 (5ème année)

- Traitement optique du signal : cours et TP (9h/an, 10 étudiants) de 1994 à 1997.

▷ **Troisième cycle**

- DEA Signaux et Systèmes de Télécommunications (Université de Bretagne Occidentale) : cours et TD en Réseaux de transmissions optiques (10h/an, 15 étudiants) de 1996 à 2003.

▷ **International**

- Institut National des Postes et Télécommunications de Rabat : conception et mise en place d'un module d'enseignement en télécommunications optiques (12h/10 étud.) en 2001.
- Hochschule für Telekommunikation Leipzig : conception et mise en place de cours, TD et TP sur la transmission optique dans le cadre du Symposium d'Etudiants Européens en Technologie de l'Information (15h/40 étud.) en 2006.
- Université Carlos III de Madrid : conception et mise en place d'un cycle d'enseignement et de travaux pratiques de Master 2 en transmission optique, (Cours et TP, 9h/8 étud.), depuis 2006.
- Réseau d'excellence Européen BONE (Building the Optical Network) : conception de cours sur la simulation de transmission optique dans le cadre d'un Master Européen en Télécoms optiques (6h) en 2008.

▷ **Formation continue (FC)**

- Contribution à la mise en place d'un cycle de télé-enseignement en traitement de signal (TuttelVisio) pour la FC au sein de la Direction de l'Enseign. Supérieur des Télécom-

munications, en 1994 et 1995.

- Mise en place d'un module de FC sur les transmissions WDM, Telecom Bretagne, 1999-2001 (15 élèves).
- Mise en place d'un module de FC sur l'évolution des réseaux de télécommunications optiques, Telecom Bretagne, 2002-2003 (30 élèves).
- Participation à un module de FC sur l'introduction à l'optique, Société DCNS, Brest, 2008 (10 élèves)
- Participation à un module de FC sur les réseaux domestiques, Société Thomson, Rennes, 2010 (15 élèves)

▷ **Encadrement divers**

- Encadrement d'une quarantaine de projets (Semestres 3 à 6) du cycle d'ingénieur de Telecom Bretagne (1994-2008)
- Tuteur référent d'apprentis-ingénieur pour la formation d'ingénieur en alternance de Telecom Bretagne (depuis 2004)
- Tuteur de spécialité et Tuteur de méthodologie (Semestres 1 à 5) dans le cycle de pédagogie par projet de Telecom Bretagne (depuis 2003).

▷ **Recrutement, promotion**

- Membre du jury de sélection des Admis sur Titres à Telecom Bretagne.
- Membre du jury de sélection des élèves-ingénieur de la formation par alternance de Telecom Bretagne.
- Membre du jury de sélection du Master Recherche PHYPHOTON de l'ENSSAT, Telecom Bretagne, l'ENIB et l'Université de Bretagne Sud.
- Membre du jury de sélection du Master Recherche PHOTIN de l'ENSSAT, Telecom Bretagne, l'ENIB et l'Université de Bretagne Sud.
- Promotion pour le recrutement à Telecom Bretagne : participation régulière aux salons étudiants nationaux.

● **Administration de l'enseignement**

- Membre du Conseil de la recherche de Telecom Bretagne de 1996 à 1999.
- Représentant élu du collège "Maître de Conférences" au Conseil d'Ecole de Telecom Bretagne de 2003 à 2007.
- Membre du comité de l'enseignement de Telecom Bretagne depuis 2006.
- Co-responsable du domaine d'enseignement Electronique et Physique de Telecom Bretagne depuis 2007.

● **Encadrement de stages et projets d'étudiants**

▷ **Traitement optique de l'information**

- Reconstruction d'une image 3D par holographie synthétique. Application aux structures anatomiques, Proj. d'Ing. de Télécom Bretagne (4 étud./6 mois), 1995.

- Implantation optique de la M-transformée, Stage de fin d'études, Telecom Lille 1 (6 mois), 1995.
- Transformation de coordonnées et interconnexions optiques en espace libre, Stage de DEA Electronique et Optronique, Université de Bretagne Occidentale, 1995.
- Système à optique binaire pour la vision 3D, Proj. d'Ing. de Télécom Bretagne (8 étud./6 mois), 1997.
- Gas laser absorption detection by infrared spectroscopy, Proj. d'Ing. de Télécom Bretagne, 2003.
- Measurement Setup for Electro-optic characterization and Stress Test of CMOS Image Sensors for Automotive Applications, Stage de fin d'études de Telecom Bretagne, 2004.
- Dimensionnement et implantation d'un système de contrôle de la qualité des composants automobiles, Proj. d'Ing. de Télécom Bretagne (4 étud./6 mois), 2006.
- Conception et réalisation d'un micro-illuminateur pour la tomographie de corrélation, Stage de Master Recherche "Physique et Photonique", Ecole Nationale d'Ingénieurs de Brest, 2008.

▷ **Eléments diffractants reconfigurables**

- Eléments optiques diffractants par effet Moiré, Proj. d'Ing. de Télécom Bretagne, (2 étud./6 mois), 1994.
- Réseaux holographiques adressés électriquement, Stage de DEA Electronique et Optronique, Université de Bretagne Occidentale, 1996.
- Intégration d'un modulateur spatial de lumière à cristal liquide dans un dispositif d'interconnexions reconfigurables entre fibres optiques monomode, Stage de fin d'études de l'ENSP de Strasbourg, 1997.
- Caractérisation de modulateurs spatiaux de lumière "cristal liquide sur silicium" pour la déflexion holographique de micro-faisceaux, Stage de Maîtrise Phys. et appl., Université de Bretagne Occidentale, 2002.
- Etude et conception d'un atténuateur optique utilisant un défecteur holographique, Proj. d'Ing. de Télécom Bretagne (4 étud./6 mois), 2002.
- Caractérisation de modulateurs spatiaux LCOS pour la commutation optique, Proj. d'Ing. de Télécom Bretagne, (3 étud./6 mois), 2003.
- Caractérisation d'un système d'interconnexions bidimensionnelles de canaux optiques WDM, Proj. d'Ing. de Télécom Bretagne, (2 étud./3 mois), 2005.

▷ **Commutation optique spatiale**

- Commutation en espace libre entre fibres optiques, Proj. d'Ing. de Télécom Bretagne (5 étud./6mois), 1998.
- Validation d'un prototype de commutateur optique holographique entre fibres optiques monomodes, Proj. d'Ing. de Télécom Bretagne (7 étud./6 mois), 1999.
- Supervision d'un commutateur optique spatial, Proj. d'Ing. de Télécom Bretagne (7 étud./6 mois), 2000.
- Dimensionnement d'un commutateur holographique 3D en technologie "holoswitch", Proj. d'Ing. de Télécom Bretagne (6 étud./6 mois), 2001.
- Techniques de commutation photonique, Stage de fin d'études de Telecom Bretagne, 2002.
- Etude, montage et caractérisation d'un sélecteur de canaux optiques, Stage de Mastère Européen en Télécoms et Datacoms Optique, Telecom Bretagne, 2002.
- Intégration et automatisation d'un commutateur optique spatial bi-dimensionnel, Proj. d'Ing. de Télécom Bretagne (3 étud./3 mois), 2004.

▷ **Nœuds de routage optique**

- Modélisation et simulation de nœuds de brassage pour les réseaux WDM, Proj. d'Ing. de l'Institut National des Postes et Télécommunications (INPT) de Rabat, 2004.
- Impact de la cascade de Wavelength Blocker sur une transmission optique Long Haul NRZ à 10 Gbit/s, Stage de fin d'études de Telecom Bretagne, 2004.
- Simulation de nœuds optiques sous simulateur VPI, Proj. d'Ing. de Télécom Bretagne (3 étud./6 mois), 2005.
- Etude statique et dynamique de WSS en vue de la réalisation d'un ROADM pour un système de transmission optique à 10 et 40 Gbit/s, Stage de fin d'études de Telecom Bretagne, 2005.
- Distorsions due to optical filtering in WDM systems, Stage de Mastère Européen en Télécoms et Datacoms Optique, Telecom Bretagne, 2006.
- Etude de nœuds de routage optique, Proj. d'Ing. de Télécom Bretagne (2 étud./1 mois), 2006.
- Caractérisation système de dispositifs R-OADM et T-OADM pour les réseaux WDM, Stage de fin d'études de Telecom Bretagne, 2006.
- Etudes et spécification de nœuds de routages optiques et des composants optiques, Stage de fin d'études de Telecom Bretagne, 2008.

▷ **Modélisation et simulation de réseaux de transmission optique**

- Evaluation des performances et QoS d'un réseau ATM à transport optique reconfigurable, Proj. d'Ing. de Telecom Bretagne (7 étud./6 mois), 1997.
- Protection dans les réseaux optiques, Stage de fin d'études de Telecom Bretagne, 1998.
- Simulation d'un anneau optique WDM, Proj. d'Ing. de Télécom Bretagne, (6 étud./6 mois), 1999.
- Etude des technologies xDSL et de leur intégration dans un réseau d'opérateur, Stage de fin d'études de Telecom Bretagne, 1999.
- Simulation d'un anneau optique multicolore, Proj. d'Ing. de Télécom Bretagne, (6 étud./6 mois), 2000.
- Simulations of a 40-wavelength C-band unidirectional 6-span system with the PTDS simulator, Stage de fin d'études de Telecom Bretagne, 2001.
- Composants optiques pour réseaux WDM, Stage de fin d'études de Telecom Bretagne, 2001.
- Optical transmission simulation using PTDS simulator, Stage de fin d'études de Telecom Bretagne, 2001.
- Simulation d'une liaison optique WDM, Proj. d'Ing. de Télécom Bretagne, (3 étud./3 mois), 2001.
- Simulation d'un anneau DPT, Stage de Mastère en Télécoms Optique, Telecom Bretagne, 2001.
- Développement d'un outil de planification du réseau longue distance Pan Européen, Stage de Mastère Européen en Télécoms et Datacoms Optique, Telecom Bretagne, 2002.
- Systèmes SDH pour réseaux métropolitains, Stage de fin d'études de Telecom Bretagne, 2002.
- Etude expérimentale de l'impact lié au filtrage et à la dispersion chromatique d'une cascade d'OADM, Stage de fin d'études de Telecom Bretagne, 2003.
- Etude des variations statistiques des paramètres physiques dans un réseau de transmission optique transparent, Stage de fin d'études à Telecom Bretagne, 2003.
- Etude, qualification et expérimentation de solutions innovantes dans le réseau optique de RTE, Stage de fin d'études de Telecom Bretagne, 2006.
- Organisation de la qualité en recherche appliquée, Proj. d'Ing. de Télécom Bretagne, (6 étud./6 mois), 2007.

- Etude sur les réseau d'accès optiques pour les marchés professionnels et entreprises, Stage de fin d'études de Telecom Bretagne, 2007.

Troisième partie

Sélection de publications

Node-based reconfigurable volume interconnections.

1. Principles and optical design

B. Fracasso and J.-L. de Bougrenet de la Tocnaye

We present a general-purpose three-dimensional interconnection network that models various parallel operations between two data planes. This volume interconnection system exhibits reconfigurable capabilities because of parallel and externally weighted interconnection modules, called nodes. We propose a generic optical implementation based on the cascading of two planar hologram arrays, coupled with a bistable optically addressed spatial light modulator. The role of this component is discussed in terms of energy regeneration and spatial cross-talk limitation. As an example, a binary matrix-matrix multiplier is implemented that uses a ferroelectric liquid-crystal light valve.

Key words: Free-space optical interconnections, space-variant systems, computer-generated holograms, optoelectronic computing, optically addressed spatial light modulator, smart photosensors.

1. Introduction

The basic architecture of many optical information-processing systems consists of one, two, or more planes in which continuous or discrete processing elements are arranged in two dimensions [e.g., micro-laser arrays, spatial light modulators (SLM's), or very-large-scale integrated optical circuits]. In this framework, interconnects that use free space seem to be the most attractive candidates for overcoming the problem of transferring a huge amount of information between two data planes. Any optical implementation will then depend strongly on the interconnections topology, especially in terms of fan-out and the degree of space invariance. The fan-out of the interconnections, causing loss of light power, remains a major limiting parameter in the case of large networks. While it is possible to achieve a wide class of space-invariant optical interconnects by use of imaging setups, space-variant schemes generally require holographic multiplexing schemes. A major limitation with this technique is the space-bandwidth product (SBWP) of the diffractive element, e.g., volume¹ or planar multifacet holograms.²

A general volume interconnection network was introduced and analyzed by Caulfield³ and Shamir *et al.*⁴ The architecture is based on an array of optically recorded and spatially multiplexed holograms. Ambs *et al.* experimentally demonstrated the feasibility of such large hologram matrices (i.e., 256×256) for use in a similar architecture.⁵ With the potential of the formalism, various applications can be considered in optical computing or optical neural networks.⁵⁻⁷ Nevertheless, the use of fixed holograms makes this solution unsuited to reconfigurable architectures. Our proposal aims to increase the network flexibility and the range of its potential applications. For this purpose we associate in parallel several of the above-mentioned N^4 interconnection modules, each with an individual and controllable activity. Each of these modules is referred to as an interconnection node, and the global architecture (Section 3) is termed a node-based interconnection network (NBIN).

In a passive free-space architecture this increase in the complexity of the interconnects involves a decrease in the number of parallel available channels owing to the limited SBWP of the optical system and other physical processes.⁴ To overcome these limitations while taking into account the node functionality, we introduce a generic model of an optical node (Section 4). In order to remain in a general framework, we propose incorporating some wave-front regeneration at the node level. Thus the role of the optical node is twofold: to achieve a given linkage by combination and splitting of the signal beams and to

The authors are with the Groupe Optique et Systèmes de Communication, Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications de Bretagne, BP 832, Brest Cedex 29285, France.

Received 28 December 1992; revised manuscript received 31 January 1994.

0003-6935/94/235348-15\$06.00/0.

© 1994 Optical Society of America.

regenerate the incoming information. We examine a particular solution that uses a bistable optically addressable spatial light modulator (BOASLM) at the plane of nodes. The use of a bistable component permits the incoming states to be memorized and hence permits energy regeneration when the device is read out with an external beam. To justify the choice of this type of component in terms of spatial cross-talk limitation, we give a paraxial analysis in Section 5. The option described in Section 6 is then illustrated by the choice of a ferroelectric liquid-crystal (FLC) BOASLM (Section 6). Experimental results are presented in the particular case of a binary matrix-matrix multiplier (Section 7). This solution is shown to be a first step toward the design of more efficient solutions.

2. Parallel N^4 Optical Interconnections

The massively parallel optical interconnection of an $N \times N$ input data array to an $N \times N$ output array was proposed initially by Caulfield.³ Several implementation schemes have been studied,^{3,4,8} all of them based on the use of an N^4 holographic interconnection matrix as both the weighting and the routing element. Owing to its simplicity, we consider the modified architecture proposed in Ref. 4 and depicted in Fig. 1.

The ij th hologram of the input array is designed so as to diffract light toward the mn th detector of the output array with efficiency T_{ijmn} . Therefore if A_{ij} is the light power emitted by the ij th light source, the overall power incident at the mn th detector is given by

$$C_{mn} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N T_{ijmn} A_{ij}, \quad (1)$$

which we write $C = [T]A$. This equation is an incoherent superposition if mutually incoherent individual sources are used in the input plane. From a mathematical point of view, Eq. (1) describes the input-output relationship of a two-dimensional dis-

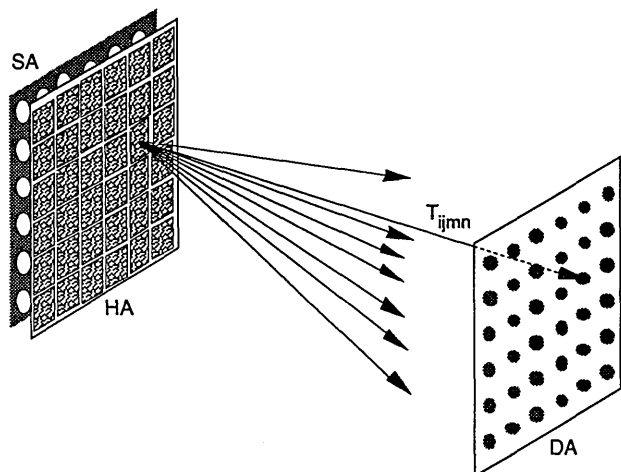


Fig. 1. Parallel N^4 optical interconnects: SA, source array; HA, hologram array; DA, detector array.

crete system with linear response $h(i, j, m, n, A_{ij}) = T_{ijmn} A_{ij}$. Choosing, for example, $T_{ijmn} = \delta(m - i) B_{jn}$, we see that Eq. (1) yields $C_{mn} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N A_{mj} B_{jn}$, which describes the multiplication of a matrix $A = \{A_{ij}\}$ with a fixed matrix $B = \{B_{ij}\}$, both containing N^2 elements.

The system may also be used to model first-order interactions in a two-dimensional neural network. In this case, $[T] = \{T_{ijmn}\}$ represents the synaptic matrix, which is initialized during the learning procedure, T_{ijmn} being the weight between units (i, j) and (m, n) . If X and Y denote the input and the output state matrices, respectively, we have $Y = \mathcal{S}([T]X)$, where \mathcal{S} is a nonlinear operator used for decision. However, the synaptic matrix is again fixed because of the use of static holograms. To increase the network performance in terms of reconfigurability, we propose associating in parallel several time-variant tensor-matrix multipliers.

3. Node-Based Interconnection Network

A. Interconnection Node

For the sake of clarity we use the same notation as in Section 2. The input and the output states are represented by matrix A and matrix C , respectively, both of size $N \times N$. A time-variant N^4 interconnection operator is then defined by its response at the mn th output point at time t :

$$C_{mn}(t) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N T_{ijmn}(t) A_{ij}(t). \quad (2)$$

The case of a tensor $[T]$ that is linearly separable in time and space,

$$T_{ijmn}(t) = w(t) \Phi_{ijmn}, \quad (3)$$

i.e., $[T(t)] = w(t)[\Phi]$, is of particular interest, for it can be implemented optically with fixed holograms and spatial light modulators (see Section 4). In what follows, an interconnection operator satisfying Eq. (3) will be referred to as an interconnection node, with a weight $w(t)$ representing its activity at a given time (see Fig. 2). By definition, w equals zero if the node is in an inactive state. The interconnection node is thus characterized by both a fixed four-index tensor $[\Phi]$, which describes its spatial behavior, and by a variable weight $w(t)$.

B. Global Network Geometry

We now aim to interconnect A and C through an intermediate array of $M \times M$ nodes. The kl th node is characterized by its spatial tensor $[\Phi^{kl}]$ and its weight W_{kl} . Under these assumptions the contribution of this particular node at the mn th output at a given time can be expressed in the form

$$C_{mn}^{kl} = W_{kl} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \Phi_{ijmn}^{kl} A_{ij}, \quad (4)$$

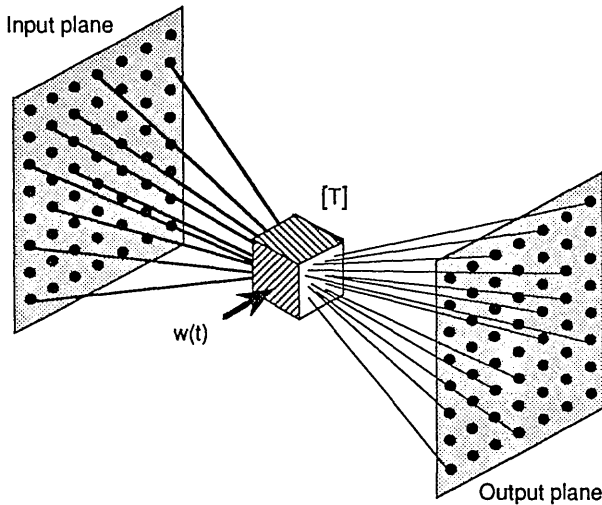


Fig. 2. Interconnection node, with spatial tensor $[T]$ and weight w .

where the variable t is omitted to simplify the notation. By summation over the node array, the m th output channel receives the overall response

$$C_{mn} = \sum_{k=1}^M \sum_{l=1}^M C_{mn}^{kl} = \sum_{k=1}^M \sum_{l=1}^M \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M \Phi_{ijmn}^{kl} A_{ij} W_{kl}. \quad (5)$$

The matrix $W = \{W_{kl}\}$, with $k, l = \{1, \dots, M\}$, is referred to as the weight matrix. Therefore the fixed tensor-matrix multiplication of Eq. (1) is now replaced by $C = [T(W)]A$, where $[T(W)]$ is a reconfigurable interconnection operator such that

$$[T(W)]_{ijmn} = \sum_{k=1}^M \sum_{l=1}^M W_{kl} \Phi_{ijmn}^{kl}. \quad (6)$$

C. Applications

Two particular illustrations are considered here, emphasizing the reconfigurability of the interconnection system through the weight matrix $W(t)$. At first, the interconnects can be initialized so as to complete a parallel multiplier between two variable matrices of size $N \times N$. The number of nodes required is then $M^2 = N^2$. If A and B are the two matrices to be multiplied, we choose the characteristics of the kl th node as

$$\Phi_{ijmn}^{kl} = \delta(j-k)\delta(m-i)\delta(n-l), \quad (7)$$

$$W_{kl} = B_{kl}.$$

Substituting Eqs. (7) into Eq. (5) yields

$$C_{mn} = \sum_{k=1}^M \sum_{l=1}^N \delta(j-k)\delta(m-i)\delta(n-l) A_{ij} B_{kl} = \sum_{j=1}^N A_{mj} B_{jn}; \quad (8)$$

e.g., $C = AB$, where A and B can vary. The particular form of relation (7) suggests that the kl th element of matrix B can be seen as an interconnection node between the k th column of A and the l th column of C , with weight B_{kl} . Hence this represents a fan-in and a fan-out of N . The role of node (1, 3) is illustrated in Fig. 3, for the case $N = 3$.

As a second illustration, we now discuss the case of neural networks, considered in Section 2. Because of the variability of the node activity W , the four-index synaptic matrix $[T]$ can be modified according to Eq. (6). The range of reconfigurability is, however, limited by the number of available degrees of freedom, namely, the M^2 node weights. The proposed architecture also permits us to model second-order interactions. Before we proceed with the explanation, we recall the basic features of high-order neural networks (HONN's). These systems have been shown to exhibit storage and learning capabilities⁹ larger than those of the commonly used first-order (or linear) networks. In particular their inherent abilities to implement invariances make high-order neural networks useful tools in the field of pattern recognition.¹⁰ The input-output relationship of a k th-order network can be expressed as¹⁰

$$y_i = \mathcal{S} \left[\sum_{q=1}^k T_q(i) \right], \quad (9)$$

where \mathcal{S} is a nonlinear operator used for decision making and $T_q(i)$ is a linear weighted sum over the q th-order products of inputs. For a network composed of N neurons $\{x_1, \dots, x_N\}$ the first three of these terms are

$$T_0(i) = W_0,$$

$$T_1(i) = \sum_{j=1}^N W_1(i, j) x_j,$$

$$T_2(i) = \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N W_2(i, j, k) x_j x_k, \quad (10)$$

where $W_n(i, j_1, j_2, \dots, j_n)$ is a $(n + 1)$ th-order weight

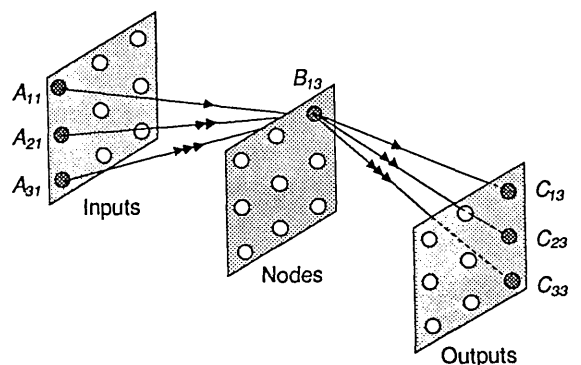


Fig. 3. Node of interconnection in the matrix-matrix multiplication case. Arrows indicate how the information coming from the input plane, A , is redirected to appropriate locations in the output plane, C .

that has been initialized during the learning process. T_0 is an adjustable threshold, and T_1 is the classical matrix-vector product. If the neurons need to be arranged in two dimensions, second-order interactions are described by

$$T_2(m, n) = \sum_{k,l} \sum_{i,j} W_2(i, j, k, l, m, n) X_{ij} X_{kl}, \quad (11)$$

where $X = [X_{ij}]$ denotes the input-state matrix. Obviously this expression is similar to Eq. (5) with $A = W$ and $W = X$ if we choose the spatial response of the kl th node such that

$$\Phi_{ijmn}^{kl} = W_2(i, j, k, l, m, n). \quad (12)$$

This property is illustrated in Fig. 4.

4. Optical Design

A. General Considerations

As was shown in Subsection 3.C, a parallel multiplier of two variable matrices is a particular case of the node-based architecture. Optical matrix-matrix multiplication has been used widely in the field of optics.¹¹⁻¹⁴ For most implementations that permit the two matrices to be reconfigurable, one or both matrices are input either one row or one column at a time. Hence these operations may be viewed as sequential tasks. The computing time, however, can be shortened by use of fast one-dimensional modulators such as acousto-optics cells.^{12,13} In addition, as the interconnects required in this particular case are almost space invariant, most of the solutions proposed are based on refractive or reflective imaging

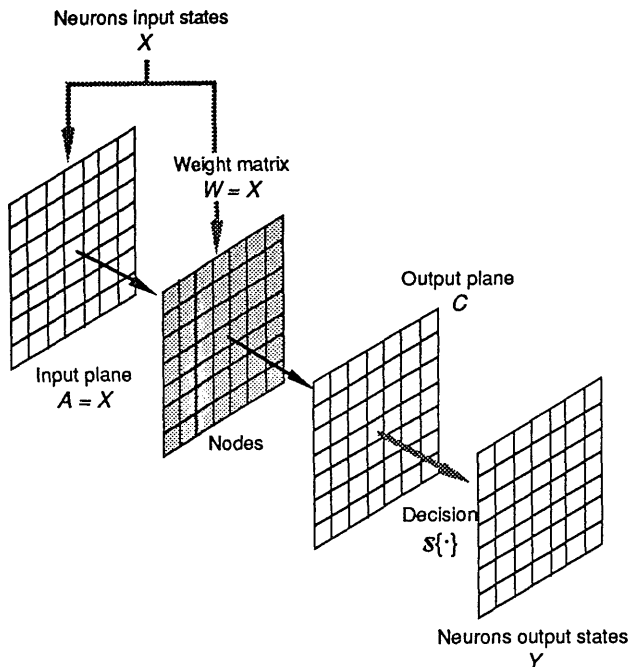


Fig. 4. NBIN in a second-order neural network scheme. The input-states matrix (i.e., the image to recognize) corresponds both to the input plane and to the weight matrix of the plane of nodes. The second-order weights are here fixed.

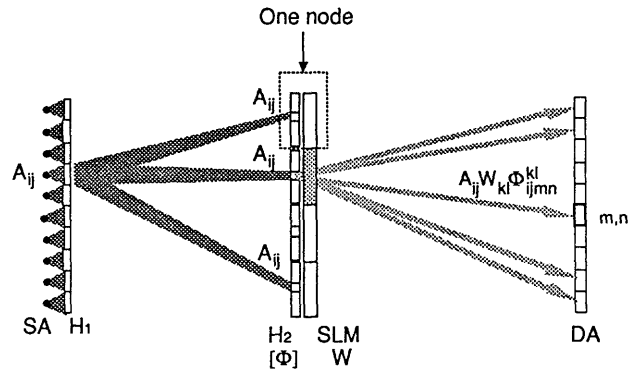


Fig. 5. Node-based interconnection architecture. A one-dimensional representation is used here for the sake of clarity. Even if additional components such as focusing lenses may be required, they are not represented here.

optics. As a consequence, such setups seem to be unsuited to arbitrary two-dimensional interconnects.

For high-order neural networks, fully parallel implementations have been reported that use holographic lenslet arrays and spatial light modulators.^{15,16} Nevertheless, the limited diffraction efficiency of the replicating optics and the lack of contrast and controllability of the SLM used seem to prohibit the implementation of large-scale optical interconnections by this method. Therefore it would appear difficult to use here the above-mentioned solutions without serious hardware modifications.

To remain in as general a framework as possible, we propose an optical scheme based on the cascading of two holographic arrays. Figure 5 depicts the generic form of the proposed architecture, for which three planes are involved. The input plane describes the states of the input channels. For simplicity we assume that they are ideally represented by the light power emitted by a two-dimensional laser diode array. The intermediate plane contains the interconnection nodes, and the output plane operates as a two-dimensional detector. We now describe the procedures performed at each plane.

Dependent on the configuration desired, each input is to be connected to a particular set of nodes. The set to which the ij th input is linked is denoted by \mathcal{N}_{ij} . As an example, Fig. 6 shows the links for two inputs in the 3×3 matrix-matrix multiplication case.

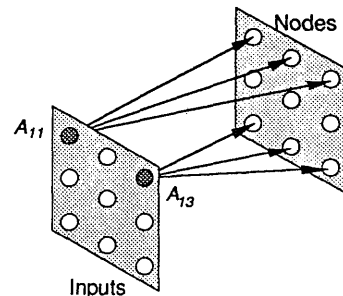


Fig. 6. Two input channels and the sets of nodes to which they are linked, in the case of matrix-matrix multiplication. We have $\mathcal{N}_{11} = \{B_{11}, B_{12}, B_{13}\}$ and $\mathcal{N}_{13} = \{B_{31}, B_{32}, B_{33}\}$.

As these input-nodes interconnections are likely to be space variant, a first holographic array, H_1 , is required in the input plane. The ij th facet is designed so as to replicate the optical distribution A_{ij} onto the nodes of \mathcal{N}_{ij} instead of replicating A_{ij} onto the whole node array. Dependent on the way the input hologram is realized (e.g., optically recorded or computer generated), additional components such as lenses may be required as focusing elements. The inputs to a single node then consist of a set of optical beams that have been directed from the sources in a prescribed manner.

At the kl th node the second step consists of generating at the output plane the different spatial responses $A_{ij}\Phi_{ijmn}^{kl}$ multiplied by the temporal weight W_{kl} . To do this, we use a technique similar to that employed in the N^4 architecture (Section 2). A local multifacet hologram H^{kl} is designed for this particular node such that the ij th facet of H^{kl} , illuminated by a local replication of A_{ij} , produces $A_{ij}\Phi_{ijmn}^{kl}$ at the m th output point. The number of facets required in H^{kl} is given by the number of input channels addressing the kl th node. Whatever the input-node interconnection schemes used, we consider that this fan-in value may differ from one node to another. As these responses may be generated in parallel for all the nodes and modulated by the node weights, a spatial light modulator is used. However, only positive weights can then be used. In Fig. 5 the set $\{H^{kl}\}$, for $k, l = 1, \dots, M$, is denoted by H_2 . Owing to the cascading of the two hologram arrays H_1 and H_2 , this quite general optical scheme suffers from two major drawbacks. Dependent on both the quality of the input light source and the optical replicating system in terms of aberration, diffraction efficiency, and SBWP, the wave front may contain some spatial distortion in amplitude and phase when considered at the plane of nodes. These distortions can be of particularly harmful influence, as the wave fronts are not confined to small spots, but contain more complex spatial information. In addition, as each input is likely to send information to many nodes, the power of these incoming beams may be low at the plane of nodes. This may be insufficient to illuminate the holographic facets of H_2 directly, especially when we consider that they act as beam-splitter elements. Therefore, we propose to modify the architecture at the node plane by including an optoelectronic module in between.

B. Node Structure

Instead of direct cascading of the two holographic layers as above, the plane of nodes is now composed of three layers,¹⁷ as shown in Fig. 7. The first layer is a bistable optically addressed spatial light modulator (BOASLM), which detects and regenerates the information directed from the input plane so that it is presented to the beam-splitting stage with the correct shape and magnitude. The regenerative role of the light valve is analyzed in detail in Section 6, and we focus here on the topology of the plane of nodes.

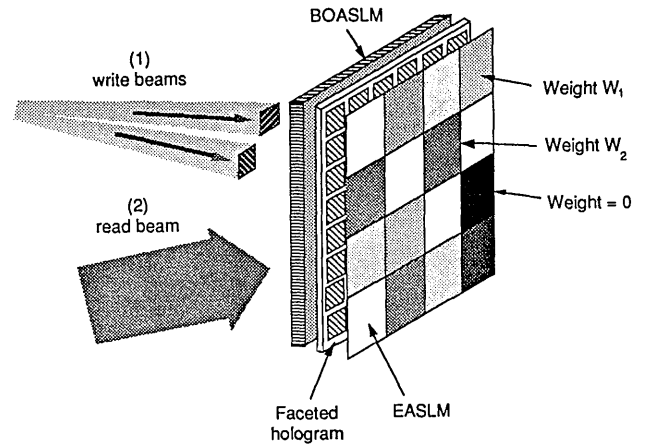


Fig. 7. Three layers of the plane of nodes, represented in the transmissive configuration. The incoming interconnection patterns are memorized in the light valve, which then acts as an optically programmed shutter. The latter is read with a second (uniform) beam, and the node responses are generated at the output plane by the second multifaceted hologram. The matrix W of (positive) weights is input by the pixels transmittance of an electrically addressed spatial light modulator (EASLM).

The plane of nodes containing $M \times M$ elements, the BOASLM area, is subdivided into M^2 spatial domains, each corresponding to a node input area. As shown in Fig. 8, one then achieves spatial multiplexing inside the kl th node by dividing its input area into f_{kl}^{in} subdomains, f_{kl}^{in} denoting the fan-in of the kl th node. Whatever the particular configuration, the value of f_{kl}^{in} is assumed to vary from one node to another. If the ij th input channel is connected to that particular node, then the ij th input holographic facet generates a square diffraction pattern of relative intensity A_{ij} , written onto the BOASLM at the node subarea corresponding to the ij th input channel. This subdomain is denoted by D_{ij}^{kl} and is centered at the coordinates $(u_{kl}^{ij}, v_{kl}^{ij})$ of the plane of nodes. Figure 9 shows a possible two-dimensional spatial tessellation of the nodes, corresponding to the 3×3 matrix-matrix multiplication.

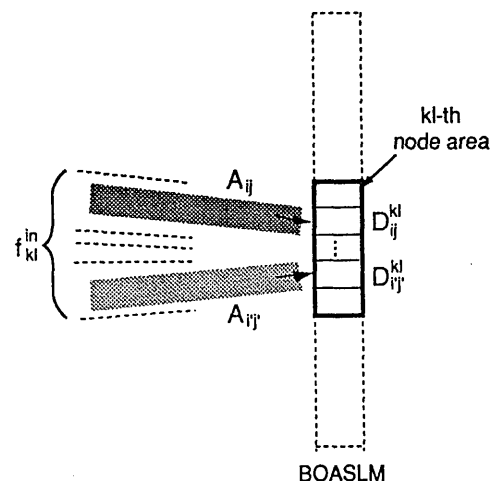


Fig. 8. Spatial multiplexing at the OASLM.

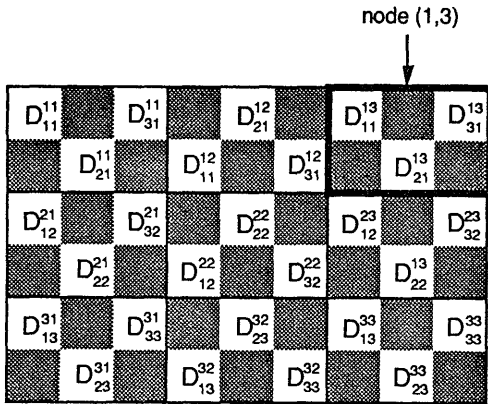


Fig. 9. Possible spatial tessellation of the plane of nodes for the 3×3 matrix-matrix product. As the kl th node is addressed only by the elements of the k th column of the input matrix, three subdomains are required per node.

This arbitrary checkerboard arrangement, even if it reduces the available BOASLM area, permits us to reduce the cross talk inside a node and between adjacent nodes. Because of the bistability of the light valve, the ij th input state A_{ij} is truly memorized at each node connected to that particular input (i.e., belonging to \mathcal{N}_{ij}). Of course, this is achieved in parallel for the N^2 input channels.

At the kl th node the fixed strength of the connections between the ij th input port and the output ports is encoded into a holographic facet, G_{ij}^{kl} , placed in front of D_{ij}^{kl} . With the notation used in Subsection 4.B, G_{ij}^{kl} is the ij th facet of H^{kl} . When the subhologram G_{ij}^{kl} is illuminated by a local plane wave of unity amplitude, it produces the node responses Φ_{ijmn}^{kl} in the output plane for $m, n = \{1, \dots, N\}$. When the overall BOASLM area is read out with a uniform extended beam, the beam-splitting operation is achieved in parallel for all the nodes. The final layer of the plane of nodes is a transmissive electrically addressed spatial light modulator (EASLM) (nematic or smectic A* liquid crystal) that provides the weight matrix W by modulating the outgoing light beams.

The output plane consists of a two-dimensional detector containing $N \times N$ elements, which can be made with a photodiode array or a second BOASLM. In the following section the introduction of the regenerative function is justified by examination of energy loss and spatial cross talk under the paraxial approximation (aberrations are not taken into account).

5. Energy and Cross-Talk Considerations

Ideally the elements of the input array should be introduced by a two-dimensional array of mutually incoherent monochromatic sources, such as cavity surface-emitting laser diode arrays (or microlasers).^{18,19} Although it is still technically difficult to achieve, this solution minimizes the coherence noise in the remainder of the system, as noted by Schamir *et al.*⁴ A more realizable and simpler solution for obtaining a switchable source array consists of spa-

tially modulating an extended, uniform coherent beam with the pixels of an EASLM. In particular, interesting solutions have been proposed recently by Lohmann and Sinzinger²⁰ to improve the performance of array illuminators in terms of coherence noise, homogeneity, and defects caused by the use of a single source as a light supply. In general this solution makes the input-hologram responses add coherently in the plane of nodes. In the present case, as the node subdomains are separated spatially, the input responses do not produce interference fringes if no cross talk occurs. In the presence of cross talk, the problem can be partly circumvented in the case of binary NBIN's because of the nonlinear input-output characteristic of the optically addressed spatial light modulator (OASLM) (Section 6).

To simplify the analysis, we assume an array of mutually uncorrelated monochromatic sources of wavelength λ as power supplies in the input plane. The input matrix A is then represented by the optical signal

$$\mathcal{A}(x, y) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N A_{ij} U_{ij}(x - a_i, y - a_j), \quad (13)$$

where (a_i, a_j) are the coordinates at which the ij th element is located in the input plane and $U_{ij}(x, y)$ is the amplitude distribution of the light emitted by one source of the laser array. For simplicity we assume the individual beams to be collimated by suitable optics so that

$$|U_{ij}(x, y)| \propto \text{rect}\left(\frac{x}{d}, \frac{y}{d}\right) \quad \text{for } i, j = \{1, \dots, N\}, \quad (14)$$

where $\text{rect}(x, y) = 1$ if $|x| \leq 1/2$ and $|y| \leq 1/2$, and $\text{rect}(x, y) = 0$ otherwise. $Nd \times Nd$ is the size of the physical input plane. If necessary, the elementary source profile can be incorporated in the input hologram design.

The interconnection pattern addressing the particular set of nodes \mathcal{N}_{ij} addressed by the ij th input is described at the latter by a complex amplitude $f_{ij}(x, y)$. Ideally the distribution f_{ij} is centered at the origin of the input plane and is of infinite extent. Taking into account both the spatial multiplexing and the limited size of the input holographic facets, we can express the input hologram transmittance as

$$\mathcal{H}_1(x, y) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \left[f_{ij}(x, y) \text{rect}\left(\frac{x}{d}, \frac{y}{d}\right) \right] * \delta(x - a_i, y - a_j), \quad (15)$$

where $*$ denotes the convolution operation. Therefore the light intensity at the input plane is equal to $|\mathcal{H}_1 \mathcal{A}|^2$. To avoid alignment constraints, we consider that the plane containing the nodes is the Fourier conjugate plane of the input plane. If the coordinates (u, v) represent the spatial frequency in the plane of nodes, the ij th input (monochromatic) chan-

nel generates at the plane of nodes the Fourier diffraction pattern, given by

$$F_{ij}(u, v) = A_{ij}\varphi_{ij}(u, v)[\mathcal{F}f_{ij}(u, v) * \text{sinc}(du, dv)], \quad (16)$$

with a linear phase factor $\varphi_{ij} = \exp[i2\pi(a_iu + a_jv)]$, \mathcal{F} symbolizing the Fourier-transform operator, and $\text{sinc}(x, y) = \sin(\pi x)\sin(\pi y)/(\pi xy)^2$. The effects of the convolution, because of the limited aperture of the input facets, is studied later in the paper. So, for the moment, the sinc term can be ignored. If the kl th node belongs to \mathcal{N}_{ij} , it is activated by a part F_{ij}^{kl} of the diffraction pattern F_{ij} (Fig. 10) such that

$$F_{ij}(u, v) = \sum_{(k,l) \in \mathcal{N}_{ij}} F_{ij}^{kl}(u, v). \quad (17)$$

Ideally the distribution $F_{ij}^{kl}(u, v)$ is (for each k and l) a uniform square of relative amplitude A_{ij} located at the BOASLM subdomain D_{ij}^{kl} . Therefore the kl th node receives in parallel the (incoherent) sum of the f_{kl}^{in} spatially separated input signals

$$H_{kl}(u, v) = \sum_{(i,j) \in \mathcal{N}_{kl}} F_{ij}^{kl}(u, v), \quad (18)$$

where \mathcal{N}_{kl} is the set of inputs addressing the kl th node. To evaluate the maximum power available at each elementary channel of the BOASLM, namely, at one subdomain D_{ij}^{kl} , we denote the overall available optical power in the input plane by I_0 . We then assume that each input source emits an optical power of $|U|^2 = I_0/N^2$. Taking into account the diffraction efficiency η_{ij} of the ij th input holographic facet and the number σ_{ij} of nodes in \mathcal{N}_{ij} , we obtain an estimate of the power available at the subdomain D_{ij}^{kl} , given by

$$p_{ij} = \frac{I_0 A_{ij}^2 \eta_{ij}}{N^2 \sigma_{ij}}, \quad (19)$$

where an equal repartition of energy between the σ_{ij} components of F_{ij} is assumed. If we consider such numerical values as $A_{ij} = 0.5$, $\eta_{ij} = 0.5$, and $\sigma_{ij} = N = 50$, the node receives an optical power of $2(10^{-6})I_0$. As this represents the power level illuminating the holographic facet, G_{ij}^{kl} , acting as a beam splitter

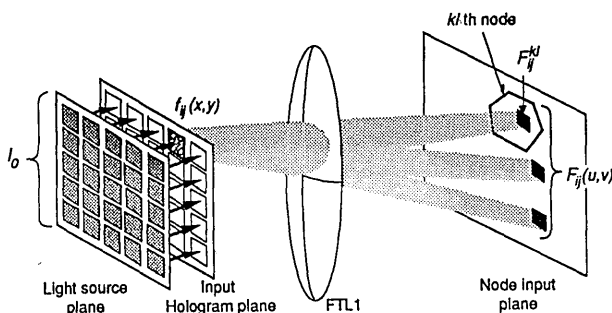


Fig. 10. Node-plane addressing. Each input subhologram is designed as a Fourier-transform hologram, which encodes the interconnection pattern between an input channel and a set of node inputs.

element, the power levels may be low at the output plane. In addition, it is worth noting that the value given in Eq. (19) is valid only when the distribution F_{ij}^{kl} is an ideal uniform square pattern. Truncation effects that are due to the limited aperture of an input holographic facet must be also considered. The resulting convolution operation generates nonuniformities in F_{ij}^{kl} as well as cross talk between adjacent domains; thus the right-hand side of Eq. (19) should be better viewed as an upper bound. This limitation, which can be corrected for by a standard apodization technique at the input hologram, has a particularly harmful effect when piecewise constant functions, such as F_{ij} , are to be generated. This low-pass filtering causes edge ringing and overshoots at the discontinuity points, which is the well-known Gibbs effect. A two-dimensional computer simulation is given in Fig. 11. The desired one-to-one binary node-plane diffraction pattern (of width B) is given by the expression

$$F(u, v) = \text{rect}\left(\frac{u}{B}, \frac{v}{B}\right), \quad (20)$$

represented in Fig. 11(a). Its inverse Fourier transform $f(x, y) = \text{sinc}(Bx)\text{sinc}(By)$ is then truncated by a rectangular window of width d , representing the limited size of an input channel or facet. The resulting Fraunhofer diffraction pattern is given by

$$\begin{aligned} F_r(u, v) &= \mathcal{F}\left[\text{sinc}(Bx)\text{sinc}(By)\text{rect}\left(\frac{x}{d}, \frac{y}{d}\right)\right] \\ &= G(u)G(v), \end{aligned} \quad (21)$$

with

$$\frac{\pi}{D} G(u) = \text{Si}\left[\pi d\left(u + \frac{B}{2}\right)\right] - \text{Si}\left[\pi d\left(u - \frac{B}{2}\right)\right], \quad (22)$$

where Si represents the tabulated sine integral function, defined by $\text{Si}(x) = \int_0^x \sin t/t dt$. The intensity distributions corresponding to the different truncations widths, d , of the sinc function to 6, 4, 2, and 1 sidelobes are shown in Fig. 11(b)–11(e), respectively. In Fig. 11(f), only the central lobe has been kept. A cross section of each intensity distribution is given. If a one-to-many interconnect is to be considered, the Gibbs effect is the same in each subdomain. The overshoot (or edge ringing) at the discontinuity points induces cross talk between adjacent channels owing to the broadening of the spatial support of the local pattern. This phenomenon can be minimized by a proper spatial arrangement of the channels inside a node (see Fig. 9) but to the detriment of channel density and hence capacity. A measure of the cross-talk ratio for optical binary logic is presented in Ref. 21 and could be adapted for use here. The second fluctuation is the undulatory behavior of the central part of the actual interconnection function F_r , which is undesirable since the holographic facets of the node

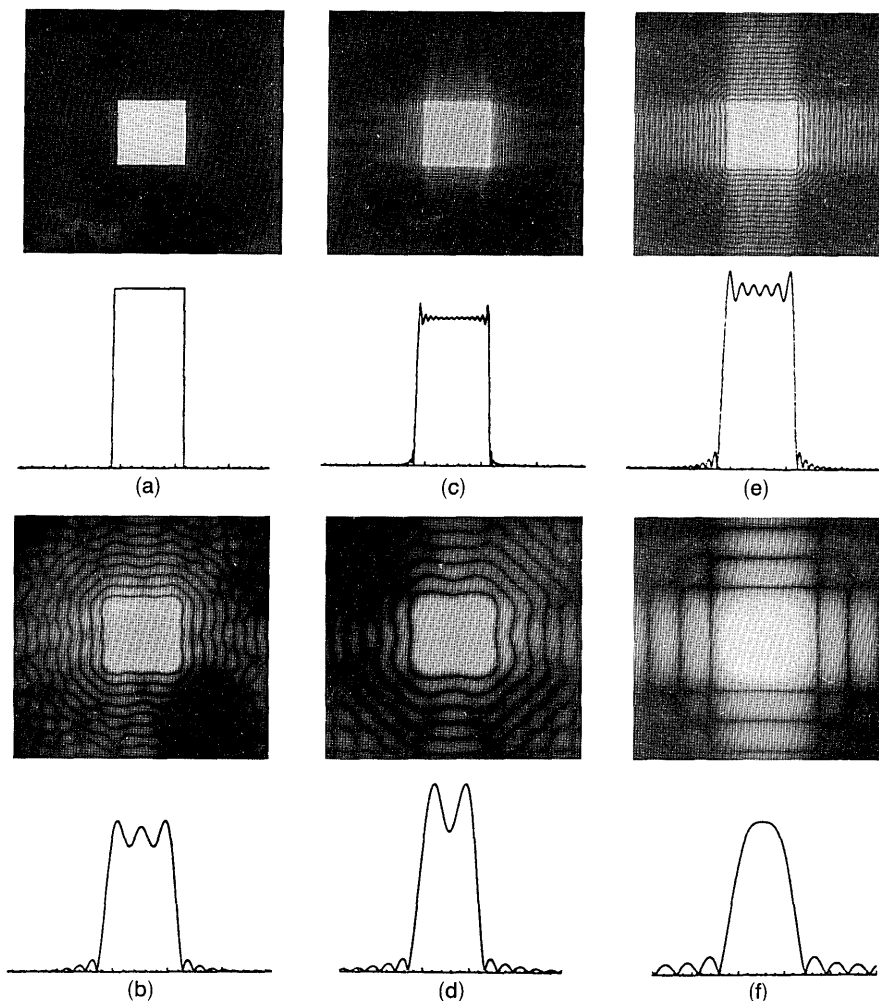


Fig. 11. Reconstructed intensity distributions for different window sizes. The computer simulations were performed on 256×256 pixel images, and the extent of the interconnect is $B = 30$ pixels. Only the central parts of the images are displayed.

plane have to be illuminated as uniformly as possible. We could avoid these undulations, together with the overshoot, by introducing a windowing function in the encoding of the input facets. This is possible with computer-generated holography, decreasing, however, the corresponding hologram diffraction efficiency. An alternative solution simply consists of adjusting the threshold of the OASLM, as we see in Section 6.

More generally speaking, the two problems involved here are energy concentration and cross-talk limitation with both spatially and band-constrained distributions. These questions have been studied in detail by Slepian *et al.*²² With the notations used previously and recalled in Fig. 12 we consider a one-to-one interconnect between an input channel (i, j) and a node (k, l) by means of an elementary node input area, D_{ij}^{kl} . This node subdomain is located at the coordinates $(u_{ij}^{kl}, v_{ij}^{kl})$, and its spatial extension is B ; d is the finite hologram size. Given the class of all functions F band limited by d , e.g., $f(x) = 0$ for $|x| \geq d/2$, we seek an optimal function $F_o(u)$ such that the

energy ratio defined by

$$\beta = \frac{\int_B |F(u)|^2 du}{\int_{-\infty}^{+\infty} |F(u)|^2 du} \quad (23)$$

is maximum. In other words we want to concentrate the largest amount of energy in the fixed subdomain aperture B , while retaining as band-limited a distribution as possible.

The optimum function satisfying the criterion of energy concentration in Eq. (23) fulfills the integral equation²²

$$\kappa\varphi(x) = \int_B \varphi(\xi) \frac{\sin \pi d(x - \xi)}{\pi(x - \xi)} d\xi \quad (24)$$

and is shown to correspond to the largest eigenvalue $\kappa = \kappa_0$. The solutions $\varphi_0(x, dB)$ are referred to as prolate spheroidal wave functions. The optimum

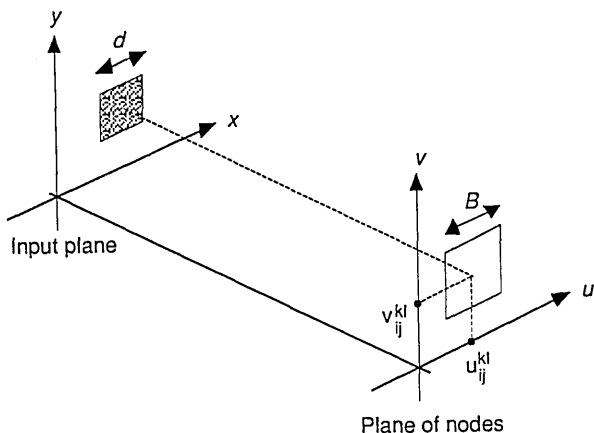


Fig. 12. Energy concentration geometry. The input plane and the node plane are supposed to be Fourier conjugate spaces.

hologram apodized transmittance in terms of energy concentration at the subdomain is then given by

$$f_0(x) = \varphi_0(x, dB) \text{rect}\left(\frac{x}{d}\right). \quad (25)$$

The problem of one-to-many interconnects between the ij th input and \mathcal{N}_{ij} can be extrapolated intuitively from the one-to-one case by consideration of the two-dimensional complex transmittance:

$$f_{ij}(x, y) = f_0(x, y; dB) \sum_{(k, l) \in \mathcal{N}_{ij}} \exp[i2\pi(u_{ij}^{kl}x + v_{ij}^{kl}y)]. \quad (26)$$

To verify this assumption, we performed computer simulations using an iterative Fourier-transform projection algorithm. We consider here one-dimensional distributions. The constraints at the plane of nodes are specified by the locations of N subdomains of size B . The constraint at the input plane is the finite size of the input facet, d . Starting from a random input complex amplitude, we can describe the n th iteration of the algorithm as the following.

(1) Computation of the Fourier transform of the hologram distribution: $F_n = \mathcal{F}f_n$.

(2) Multiple spatial truncations at the Fourier plane (plane of nodes):

$$F_n^t(u) = F_n(u) \sum_{k=1}^N \text{rect}\left(\frac{u - u^k}{B}\right),$$

where u^k is the position of the center of subdomain k of width B .

(3) Computation of the inverse Fourier transform: $f'_n = \mathcal{F}^{-1}F_n^t$.

(4) Spatial truncation at the input plane:

$$f_{n+1}(x) = f'_n(x) \text{rect}\left(\frac{x}{d}\right).$$

A simulation result is represented in Fig. 13. Maximizing the energy ratio given by Eq. (23) provides a quantitative solution. It does not take into account

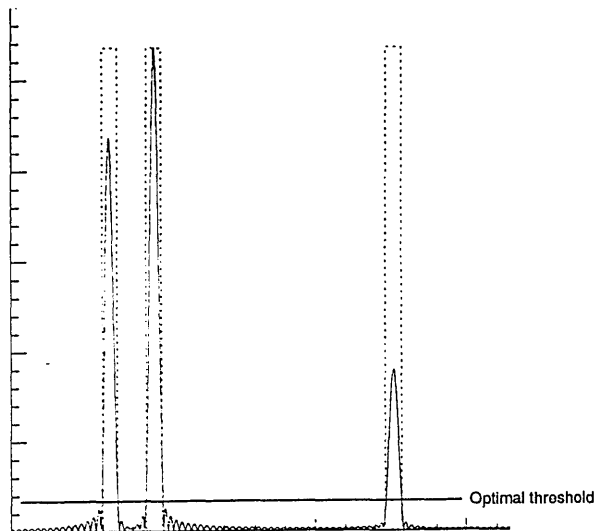


Fig. 13. Energy concentration into several subdomains.

the hologram encoding constraints nor the additional degrees of freedom introduced by the two-dimensional detector at the plane of nodes. Such an analysis is beyond the scope of this paper and is developed in another paper.²³

6. Illustration: Ferroelectric Liquid-Crystal Bistable Optically Addressable Spatial Light Modulator

In this section we discuss the use of a ferroelectric liquid-crystal BOASLM to implement NBIN's characterized by binary input states: A_{ij} equals 0 or 1. The component used is a surface-stabilized ferroelectric liquid-crystal BOASLM²⁴ manufactured by BNR Europe, and its structure is shown in the cross-sectional schematic of Fig. 14. Owing to the device bistability, the incoming intensity distribution is memorized with a high contrast and can be read out in the absence of a write or a hold beam. Generally speaking, the performance of the liquid-crystal light

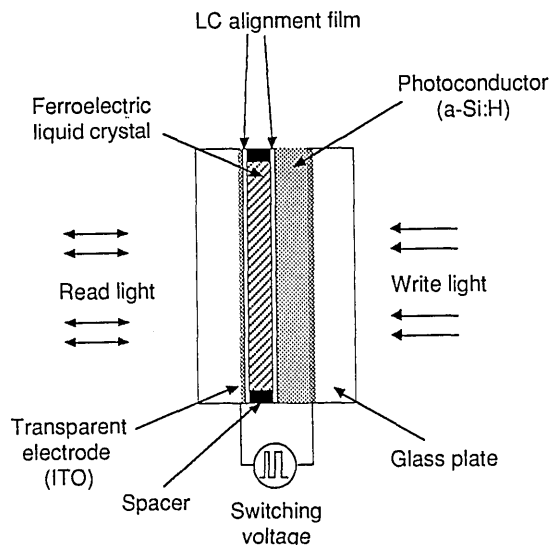


Fig. 14. Structure of the surface-stabilized FLC light valve.

valve for optical data-processing applications can be measured by the following parameters²⁵: nonlinearity, contrast, resolution, response time, optical flatness, and image quality. For the present study, which in particular does not take into account the temporal variations of the optical field, we consider only the first three features. Particular emphasis is on the device contrast, which may reach interesting values in the case of FLC materials.

A. Nonlinear Response

The capacity of FLC BOASLM's for use in memorizing binary two-dimensional patterns has been experimentally demonstrated²⁶ by imaging of binary-amplitude computer-generated holograms (CGH's) onto the device. The accuracy of the hologram mask recording, as well as the resulting quality of the reconstruction, has been noted for both the cell- and the point-oriented approach. Figure 15 shows a set of nonlinear write characteristics of the component, measured in a transmissive mode, for a binary test image composed of a bright spot of 1 mm diameter.²⁷ When the diffracted amplitude corresponding to Eq. (21) is incident upon the BOASLM, the written (or detected) spatial distribution can approach an ideal square shape if a suitable nonlinear characteristic is chosen. The spatial Gibbs phenomenon can thus be reduced greatly. A simulation result is given in Fig. 16, in which the drive parameters are set to $V_c = 25$ V and $T_c = 1.2$ ms. The spatial cross talk caused by the wavelike behavior outside the theoretical support (a) is eliminated by adjustment of the start value i_s of the nonlinear curve. At the same time the undulations at the high level of the interconnect (b) are suppressed owing to the choice of the threshold value E_t .

B. Extinction Ratio

Even if cross talk between the nodes decreases, some may occur between the output channels owing to the

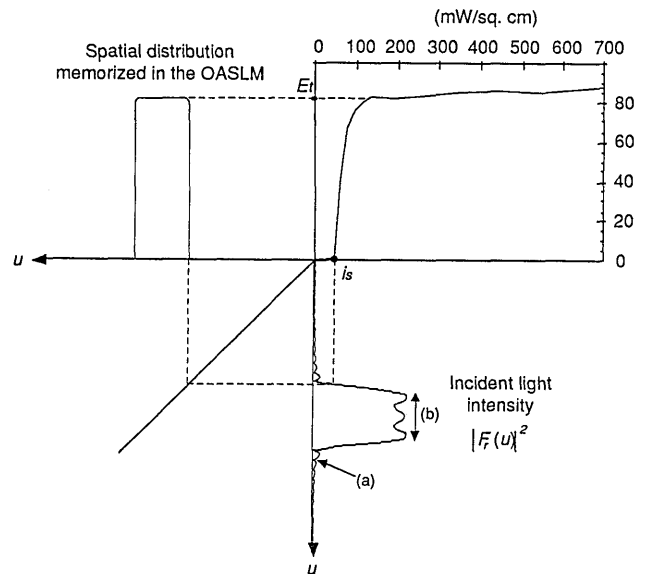


Fig. 16. Correction for the spatial cross talk. The driving voltage parameters of the BOASLM are set to $V_c = 17$ V and $T_c = 1.5$ ms. The incident intensity distribution corresponds to the simulation in Fig. 11(d).

finite extinction ratio of the light valve. As an example, a typical value of 200:1 can be expected with standard FLC BOASLM's.²⁸ The influence of this parameter on the binary network accuracy can be analyzed briefly by examination of two particular binary NBIN configurations.

The first case we consider is the matrix-matrix multiplication of two $N \times N$ binary matrices A and B , defined by

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 1 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix}. \quad (27)$$

Output matrix C contains only zero elements except for the 11th, whose value is given by

$$C_{11} = \underbrace{A_{11}B_{11}}_{=1} + \underbrace{\sum_{k=1} A_{1k}B_{k1}}_{=0} = 1. \quad (28)$$

Thus when the BOASLM is read (after the writing of the intensity pattern generated by A_{11}) with a uniform beam, the optical power incident at the 11th output channel is given by

$$P_{11} = pT_1 + (N - 1)pT_0, \quad (29)$$

where T_0 and T_1 are the transmittance factors of an unswitched and a switched area of the BOASLM, respectively, and p is the fraction of read light power corresponding to one node subdomain. The first term of the right-hand side, pT_1 , is the light power

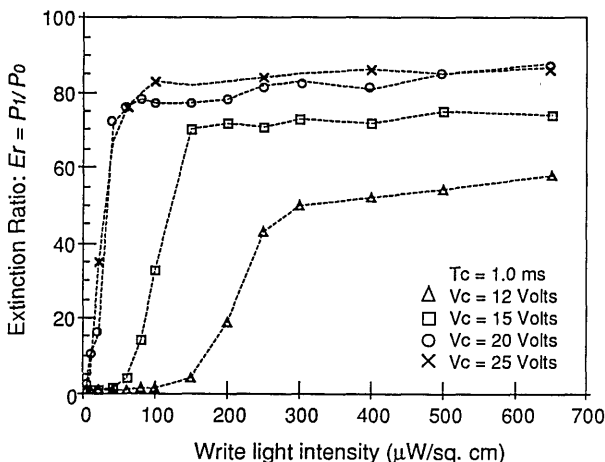


Fig. 15. Nonlinear characteristic of the FLC BOASLM. On writing, the incoming light intensity, I_e , is measured over the disk surface for a given voltage pulse of amplitude V_c and duration T_c . The SLM is then read with a uniform beam to measure the device extinction ratio.

passing through the subdomain D_{11}^{11} switched by A_{11} . The second term is a cross-talk factor owing to the nonzero weight values of the first column of matrix B . For large values of N one can consider the signal-to-cross-talk ratio²⁹:

$$\frac{P_s}{P_c} = \frac{pT_1}{p(N-1)T_0} \approx \frac{E_r}{N}. \quad (30)$$

If $E_r \leq N$, the cross-talk term P_c is greater than the signal P_s , making the measurement accuracy more awkward.

The influence of the ratio E_r can be much more limitative at the output plane. As an example, we consider the NBIN configuration illustrated in Fig. 17. In this particular case the 11th mode is addressed only by the 11th input channel, i.e.,

$$\begin{aligned} f_{11}^{\text{in}} &= 1, \\ \mathcal{N}_{11} &= \{\text{node}(1, 1)\}. \end{aligned} \quad (31)$$

Therefore the input area of this node contains only one subdomain, D_{11}^{11} , to which one holographic facet, G_{11}^{11} , is associated. In addition, the node output responses are chosen uniformly distributed across

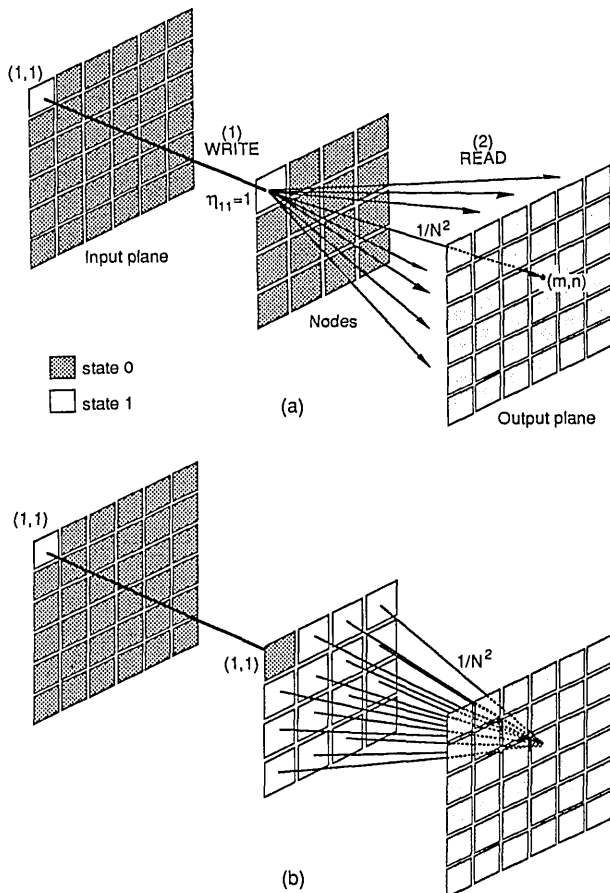


Fig. 17. Influence of the limited device extinction ratio on the output state accuracy (binary input and weight states).

the output plane:

$$\Phi_{11mn}^{11} = \frac{1}{N^2} \quad \text{for } m, n = 1, \dots, N. \quad (32)$$

In Fig. 17(a) we consider an input matrix A_1 and a weight matrix W_1 such that $A_1 = W_1$, with

$$A_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix}, \quad (33)$$

At the writing, only the subdomain D_{11}^{11} is switched, owing to $\{A_1\}_{11} = 1$. When the BOASLM is read, only the facet G_{11}^{11} is illuminated through the device, and the optical reconstruction is enabled at the output plane, as $\{W_1\}_{11} = 1$. With the assumptions in Eq. (32) the optical power incident at the m th output channel is given by

$$P_{mn}^1 = \frac{pT_1}{N^2}. \quad (34)$$

As this quantity passes through a switched area of the BOASLM, it can be considered as some pure signal, namely, the lowest signal level occurring at the output channel. We then change the weight matrix by considering

$$W_2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & \cdots & 1 \\ 1 & 1 & \cdots & 1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & 1 & \cdots & 1 \end{bmatrix}, \quad (35)$$

while keeping the input matrix unchanged [see Fig. 17(b)]. Therefore the only switched BOASLM subdomain remains D_{11}^{11} , but it is now masked owing to $\{W_2\}_{11} = 0$. At the reading the optical power incident at the output plane is caused by the light transmitted by the unswitched areas of the BOASLM and directed by the hologram. At the m th output channel this cross-talk term is given by

$$P_{mn}^2 = pT_0 \sum_i \sum_j \sum_{k \neq 1} \sum_{l \neq 1} \Phi_{ijmn}^{kl}. \quad (36)$$

Of course this quantity depends on the particular network configuration. Then, if we suppose that $f_{kl}^{\text{in}} = 1$ for each of the M^2 nodes and that the nodes' output responses are uniform across the output plane (i.e., $\Phi_{ijmn}^{kl} = 1/N^2$), the previous relation [Eq. (36)] is reduced to

$$P_{mn}^2 = pT_0 \frac{M^2 - 1}{N^2}. \quad (37)$$

To ensure that such a zero value is represented by an

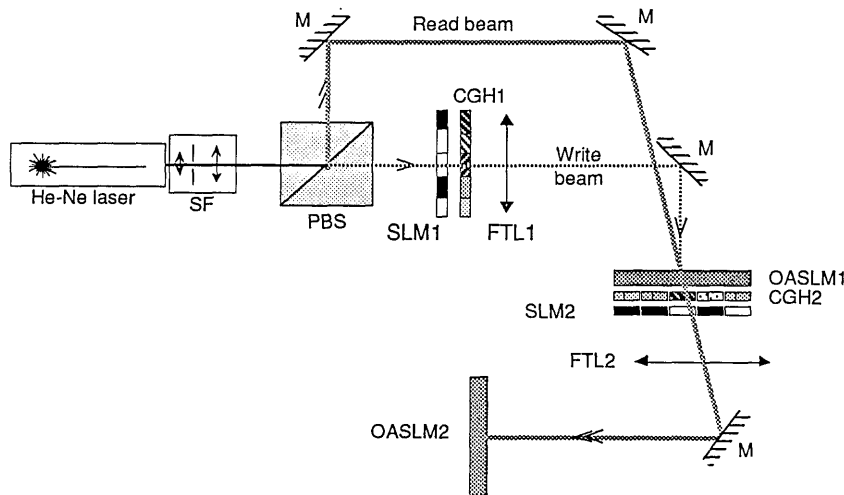


Fig. 18. Experimental setup: SF, spatial filter; M's, mirrors.

optical level lower than a nonzero value given by Eq. (34), we must have $P_{mn}^1 < P_{mn}^2$, yielding $E_r > M^2 + 1$. In this particular case the number of nodes fixes a minimal value for the signal-to-cross-talk ratio.

C. Resolution

The resolution of the BOASLM fixes a minimal area per channel, i.e., the smallest size of an elementary subdomain, D_{ij}^{kl} . This parameter depends on both the photoconductor and the FLC layer. Although a theoretical resolution of $1 \mu\text{m}$ could be attainable, some measurements performed on the device used in the experiment and presented in Ref. 27 have led to a spatial resolution of 40 line pairs/mm at 50% modulation transfer function. Therefore considering that $10 \mu\text{m}$ is a good estimate for the minimal resolution cell, we calculate that the SBWP of a $2 \text{ cm} \times 2 \text{ cm}$ BOASLM is $(2000)^2$. In the frame of binary matrix-matrix multiplication the number of subdomains necessary to achieve the product of $N \times N$ matrices grows as N^3 ; thus the upper limit is approximately $N = 2000^{2/3}$, yielding $N \approx 160$.

7. Experimental Results: Binary Network

To confirm the preceding considerations, we implemented the proposed interconnection network in the simple case of a 5×5 binary matrix multiplier. Our main purpose was not to optimize the global optical implementation but to verify the regenerative role of the OASLM. The experimental setup used is shown in Fig. 18. The source array is supplied by a spatially filtered and collimated He-Ne laser beam. The available uniform beam is then divided into two equal intensity beams by means of a polarizing beam splitter (PBS). The first binary matrix, A , is then input to the system by the 5×5 pixels of a nematic liquid-crystal EASLM that modulates one of the beams. The crossed polarizers that permit one to obtain an intensity modulation are not represented. Since the pixels set to one are transmissive, the corresponding elements of the holographic array are illuminated. Each individual facet is a 256×256

amplitude CGH of the Lohmann type,³⁰ of 4-mm pitch, which is copied into a silver halide emulsion. The diffraction efficiency obtained after bleaching is $\sim 5\%$, which is not limiting because of the gain introduced at the node level. The set of Fraunhofer diffraction patterns are reconstructed at the front focal plane of a 600-mm achromat doublet (Fourier-transform lens 1, or FTL1), at which the BOASLM is located.

Figure 19 shows an intensity distribution incident upon the BOASLM, corresponding to three active input channels: $A_{22} = A_{23} = A_{33} = 1$ and $A_{ij} = 0$ elsewhere. It can be noticed that the intensity of the bottom row (namely, the five square subdomains generated by A_{33}) is lower than that of the other subdomains. This is partly because of the nonuniform profile of the extended input beam. Two subdomains of the corresponding recorded distribution are displayed in Figs. 20(a) and 20(b) for different values of the parameters T_c and V_c . The high sensitivity of the component at this wavelength ($10 \mu\text{W cm}^{-2}$) permits the use of low-efficiency holograms similar to those used in the input plane. The second beam divided by the beam splitter is used to read the BOASLM (here in transmission). The five holographic facets corresponding to the node B_{32} , namely,

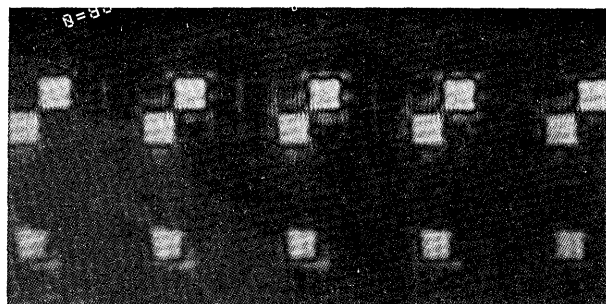
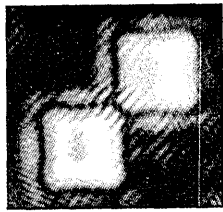


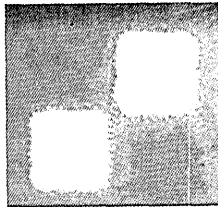
Fig. 19. Spatial interconnection function generated by three input holographic facets at the nodes inputs, i.e., at the plane of nodes and before the OASLM. The Gibbs phenomenon can be noticed at each individual subdomain.



(a)



(b)



(c)

Fig. 20. Enlarged view of two square subdomains of the interconnection distribution shown in Fig. 19. Two engravements onto the OASLM are performed for different values of the voltage amplitude and duration. The device is then read with a uniform beam.

(G_{i3}^{32} , $1 \leq i \leq 5$), are shown in Fig. 21. It can be seen from Eq. (20) that the theoretical one-to-one interconnection to be generated by G_{i3}^{32} , illuminated through the BOASLM, must be $A_{i3}B_{32}\delta(m-i)\delta(n-2)$. To this aim, we use a 64×64 cell amplitude CHF of the Lohmann type, whose SBWP is sufficient to separate spatially the 5×5 output channels.

The binary weight of the node, e.g., the value B_{hl} , is introduced by the transmittance value of the individual pixels of a 5×5 EASLM (identical to that used in the input plane). Figure 22 shows the output-plane state corresponding to the matrix multiplica-

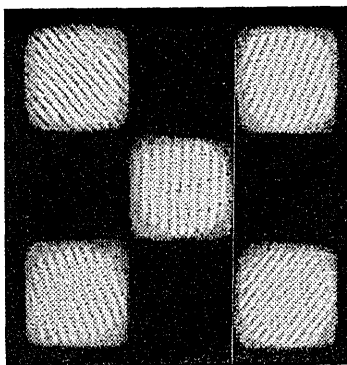


Fig. 21. Faceted subhologram mask corresponding to one node (B_{12}) in the BMM case. Each facet is a 64×64 cell amplitude CGH that addresses a single output channel.



Fig. 22. When the first OASLM (OASLM1) is read out with a uniform beam, the output binary matrix C is given by the diffracted intensity distribution in the output plane (first diffraction order).

tion $C = AB$, with

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (38)$$

This output intensity distribution, located in the front focal plane of FTL2, is available in the first order of the diffraction pattern.

8. Space-Bandwidth-Product Considerations and System Scaling

The hologram of the input plane performs a mapping between the N^2 inputs and the M^2 nodes. Dependent on the application, a completely different interconnection pattern may be required for each input. Previous research² has shown that at least M^2N^2 degrees of freedom are necessary for such a wholly space-variant interconnect scheme. In the space-invariant, but more restrictive, case the number of resolution elements required is greater than only NM . For interconnects that do not belong to either the wholly space-invariant or the wholly space-variant case, symmetries can be considered to reduce the required SBWP^{2,31} to a value between MN and $(MN)^2$.

As assumed in Section 5, each input holographic facet is designed as a Fourier-transform hologram so that the intensity connection pattern is independent of the subhologram's position. The hologram mask has a finite number of degrees of freedom, which limits both the amount of information that can be encoded in a facet and the number of subholograms that can be laid out in the input plane. To permit large networks to be constructed, we must minimize

the SBWP of the individual input facets. Since an input hologram is likely to address each of the M^2 nodes, its SBWP must be equal to at least $(qM)^2$, where q is the mean number of subdomains per node. Additional resolution elements are necessary for providing an optimal light distribution at the subdomain and, depending on the encoded method, for including a spatial carrier in the hologram transmittance.

For this diffractive, paraxial interconnection system the relationship between the subhologram size Δh (which is supposed to have square dimensions) and the Δi of the interconnection pattern at the plane of nodes is given by

$$\Delta h \Delta i = n \lambda f, \quad (39)$$

where n^2 is the SBWP of the subhologram and f is the focal length of the FTL. Thus if the input plane size is ΔA , with $\Delta A = N \Delta h$, and if ΔB , is the size of the plane of nodes, with $\Delta i = \Delta B$, we have

$$\Delta A \Delta B = n N \lambda f. \quad (40)$$

The size of the input plane and the plane of nodes is also limited by aberrations, vignetting, and the SBWP of the FTL. If D is the aperture of the FTL, the width of one resolvable point at the OASLM plane is $\delta = 2 \lambda f / D$. With typical values such as $\lambda = 633$ nm, $f = 500$ mm, and $D = 50$ mm, we obtain a minimal addressable spot in the plane of nodes of $\delta = 12$ μ m, which is consistent with the OASLM resolution mentioned.

Assuming the subdomains to be adjacent inside a node, we obtain the area of the latter as $S = s f^{\text{in}}$, where s is the area of a subdomain, depending on the SBWP required for a holographic facet, G_{ij}^{hl} , denoted by m^2 . This elementary SBWP must be at least equal to N^2 , the number of addressable output channels. If δ_{mfs} is the minimum feature size in the subhologram (G_{ij}^{hl}), we have

$$s = p^2 N^2 \delta_{\text{mfs}}^2, \quad (41)$$

where p^2 is the amount of oversampling necessary both to encode a complex value in the hologram and to separate the output channels spatially. The minimum area required for the plane of nodes is then given by

$$S_{\text{PN}} = M^2 N^2 p^2 f^{\text{in}} \delta_{\text{mfs}}^2, \quad (42)$$

where the nodes are supposed to be adjacent. The usable area of the FLC light value of BNR Europe is approximately 3 cm \times 3 cm, which fixes an upper bound to S_{PN} and hence to the channel capacity, N . In the case of binary matrix–matrix multiplication (BMMM) we have $M = N = f^{\text{in}}$; thus the network capacity is limited by

$$N = \left[\frac{(S_{\text{PN}})^{1/2}}{p \delta_{\text{mfs}}} \right]^{2/5}. \quad (43)$$

As an example, if we choose $(S_{\text{PN}})^{1/2} = 3$ cm, $p = 6$, and $\delta_{\text{mfs}} = 1$ μ m, we obtain $N \approx 30$.

9. Summary and Prospects

We have developed a model of three-dimensional interconnects, based on an array of externally weighted modules called nodes. Our main purpose was to increase the flexibility of the so-called N^4 fixed interconnection network, initially proposed by Caulfield. We have shown that the NBIN permits us to represent with the same formalism various operations such as matrix–matrix multiplication or second-order input–output relationships in a neural network. Basically these tasks may be viewed as computations between an input matrix and a matrix representing the node weights (weight matrix). Unlike the initial architecture for which one of the matrices is fixed, here both matrices are variable. The system could even be extended, in our opinion, to reconfigurable switching networks.

We have also discussed the network optical implementation, keeping the context as general as possible. In particular this involves the cascading of two space-variant interconnection operators. For this purpose, planar multifacet holograms seem to be attractive candidates in terms of data access and spatial cross-talk minimization. The network reconfigurability, located at the node weights, is achieved simply with an electrically addressed spatial light modulator. Moreover, to overcome the possible energy limitations and wave-front distortions induced by cascaded holographic elements, we have suggested incorporation of gain in the architecture.

In our solution the key element is an optically addressed spatial light modulator that is used at the node plane mainly to compensate for free-space power loss and spatial cross talk. As an illustration, a FLC OASLM has been used in the particular case of a binary NBIN. Consideration of the memorized states and the nonlinear write characteristic has permitted us to justify this approach, illustrated by the BMMM implementation. In particular it has been shown that wave-front regeneration can be performed at the plane of nodes on band-limited distributions, provided that the device has a suitable nonlinear input–output characteristic. In the BMMM case the SBWP needed for the CGH of the node plane becomes a limiting parameter as the number of channels increases because each of the facets diffracts in a field of independent sample points equal or larger than N^2 . Using electron-beam lithography techniques and disregarding aberrations, we could then obtain the maximum capacity of the matrix multiplier of 40^2 or 50^2 spatial channels. In this case the limiting parameters turn out to be the OASLM finite extinction ratio and its limited resolution.

The proposed solution is a first step toward more efficient and general solutions, for which new optoelectronic components must be considered at the node plane. Therefore the system designer must take into account the characteristics of the intermediate

two-dimensional photodetector in the input hologram encoding, in terms of topology and optical response. In particular this means that the optical distributions generated by different holograms may be converted by the light sensor to the same input node signals owing to a nonlinear detection. Among these equivalent holographic encodings the optimum choice is the one that requires the smaller SBWP, thus maximizing the overall network capacity. Conversely limitations in the holographic encoding process such as the finite SBWP, levels of quantization, and speckle may be introduced in the detector design, which is likely to contain some degrees of freedom. An optimum detector will be slightly (or even not at all) sensitive to the noise disturbing the interconnection patterns. At any rate the device will show a high resolution, a low sensitivity to speckle and coherence effects, and an adjustable and nonlocal nonlinear behavior, permitting in particular the input of the weight matrix. To do this, one may need a postelectronic processing of the detected optical signals. Such an alternative emphasizes the chief role of a matched pair (CGH and smart detector) when one considers the interconnection network implementation. This point is discussed in Ref. 23.

The authors wish to thank Guy Chuiton, from Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications de Bretagne, for his help with the illustrations.

References

1. L. M. Deen, J. F. Walkup, and M. O. Hagler, "Representations of space-variant optical systems using volume holograms," *Appl. Opt.* **14**, 2438–2446 (1975).
2. B. K. Jenkins, P. Chavel, R. Forchheimer, A. A. Sawchuk, and T. C. Strand, "Architectural implications of a digital optical processor," *Appl. Opt.* **23**, 3465–3474 (1984).
3. H. J. Caulfield, "Parallel N^4 weighted optical interconnections," *Appl. Opt.* **26**, 4039–4040 (1987).
4. J. Shamir, H. J. Caulfield, and R. B. Johnson, "Massive holographic interconnection networks and their limitations," *Appl. Opt.* **28**, 311–324 (1989).
5. P. Ambs, Y. Fainman, S.-H. Lee, and J. Gresser, "Computerized design and generation of space-variant holographic filters. 1. System design considerations and applications of space-variant filters to image processing," *Appl. Opt.* **27**, 4753–4760 (1988).
6. P. Ambs, Y. Fainman, S.-H. Lee, and J. Gresser, "Computerized design and generation of space-variant holographic filters. 2. Applications of space-variant filters to optical computing," *Appl. Opt.* **27**, 4761–4765 (1988).
7. H. J. Caulfield and H. H. Szu, "Parallel discrete and continuous wavelet transforms," *Opt. Eng.* **31**, 1835–1839 (1992).
8. F. Lin, "Practical realizations of N^4 optical interconnects," *Appl. Opt.* **29**, 5226–5227 (1990).
9. Y. C. Lee, G. Doolen, H. H. Chen, G. Z. Sun, T. Maxwell, Y. H. Lee, and C. L. Giles, "Machine learning using a higher order correlation network," *Physica D* **22**, 276–280 (1986).
10. C. L. Giles and T. Maxwell, "Learning, invariance, and generalization in high-order neural networks," *Appl. Opt.* **26**, 4972–4978 (1987).
11. J. W. Goodman, A. R. Dias, and L. M. Woody, "Fully parallel high-speed incoherent method for performing discrete Fourier transforms," *Opt. Lett.* **2**, 1–3 (1978).
12. R. A. Athale and W. C. Collins, "Optical matrix-matrix multiplier based on outer product decomposition," *Appl. Opt.* **21**, 2089–2090 (1982).
13. P. S. Guilfoyle, "Systolic acousto-optic binary convolvers," *Opt. Eng.* **23**, 20–25 (1984).
14. D. Casasent, "Acousto-optic transducers in iterative optical vector-matrix processors," *Appl. Opt.* **21**, 1859–1865 (1982).
15. J.-S. Yang, S.-Y. Chin, and Y. S. Lee, "Programmable quadratic associative memory using holographic lenslet arrays," *Opt. Lett.* **14**, 838–840 (1989).
16. J.-S. Yang, S.-G. Chin, S.-W. Yuk, S.-Y. Chin, and Y.-S. Lee, "Dynamic optical interconnections using holographic lenslet arrays for adaptive neural networks," *Opt. Eng.* **32**, 80–87 (1993).
17. B. Fracasso, C. Maissiat, P. Ambs, and J.-L. de Bougrenet de la Tocnaye, "Optical implementation of inference machine using a binary multilayer interconnection network," in *Optics in Complex Systems*, F. Lanzl, H. Preuss, and G. Weigelt, eds., *Proc. Soc. Phot-Opt. Instrum. Eng.* **1319**, 273–274 (1990).
18. J. L. Jewell, J. P. Harbison, A. Scherer, Y. H. Lee, and L. T. Florez, "Vertical-cavity surface emitting lasers: design, growth, fabrication, characterization," *IEEE J. Quantum Electron.* **27**, 1332–1346 (1991).
19. M. Orenstein, A. C. von Lehmen, C. Chang-Hasnain, N. G. Stoffel, J. P. Harbison, and L. T. Florez, "Matrix addressable vertical-cavity surface emitting lasers array," *Electron. Lett.* **27**, 437–438 (1991).
20. A. W. Lohmann and S. Sinzinger, "Improved array illuminators," *Appl. Opt.* **31**, 5447–5452 (1992).
21. J. Weigelt, "Space-bandwidth product and crosstalk of spatial filtering methods for performing binary logic optically," *Opt. Eng.* **27**, 883–892 (1988).
22. D. Slepian, H. O. Pollack, and H. J. Landau, "Prolate spheroidal wave functions, Fourier analysis and uncertainty," *Bell Syst. Tech. J.* **40**, 43–84 (1961).
23. H. Hamam, B. Fracasso, and J.-L. de Bougrenet de la Tocnaye, "Node-based reconfiguration volume interconnections. 2. Hologram encoding considerations," *Appl. Opt.* (1994).
24. J.-L. de Bougrenet de la Tocnaye and J. R. Brocklehurst, "Parallel access read/write memory using an optically addressed spatial light modulator," *Appl. Opt.* **30**, 179–180 (1991).
25. J.-L. de Bougrenet de la Tocnaye, "Ferroelectric liquid crystal light valves: application to parallel information processing," *Int. J. Opt. Comput.* **2**, 319–339 (1991).
26. B. Fracasso, P. Ambs, and J.-L. de Bougrenet de la Tocnaye, "Recording reconfigurable binary computer generated holograms on bistable optically addressed ferroelectric liquid-crystal spatial light modulator," *Opt. Lett.* **15**, 1473–1475 (1990).
27. M. Killinger, J.-L. de Bougrenet de la Tocnaye, P. Cambon, R. C. Chittick, and W. A. Crossland, "Bistability and nonlinearity in optically addressed ferroelectric liquid-crystal spatial light modulators," *Appl. Opt.* **31**, 3930–3936 (1992).
28. K. M. Johnson, M. R. Surette, and J. Shamir, "Optical interconnection network using polarization-based ferroelectric liquid crystal gates," *Appl. Opt.* **27**, 1727–1733 (1988).
29. K. M. Johnson and G. Moddel, "Motivations for using ferroelectric liquid crystal spatial light modulators in neurocomputing," *Appl. Opt.* **28**, 4888–4899 (1989).
30. A. W. Lohmann and D. P. Paris, "Binary Fraunhofer holograms, generated by computer," *Appl. Opt.* **6**, 1739–1748 (1967).
31. N. Davidson, A. A. Friesem, and E. Hasman, "On the limits of optical interconnects," *Appl. Opt.* **31**, 5426–5430 (1992).

Node-based reconfigurable volume interconnections. 2. Hologram encoding considerations

H. Hamam, B. Fracasso, and J.-L. de Bougrenet de la Tocnaye

We address free-space optical interconnections based on cascaded multifacet holographic elements, including an intermediate regeneration of the optical signals. Particular attention is paid to digital hologram encoding in the case of highly interconnected planes. Degrees of freedom selected in the reconstruction plane are used for satisfying both holographic-encoding and signal constraints. An iterative Fourier-transform algorithm is chosen because of its ability to incorporate constraint considerations.

Key words: Free-space optical interconnections, computer-generated holography, iterative Fourier-transform algorithm.

1. Introduction

Diffraction optical elements are key components in various areas. Compared with refractive solutions, they are better suited for applications dealing with reconfigurable nonregular space-variant optical interconnections. Within this area, digital holography is gaining increasing attention because of its flexibility in generating appropriate signals for the desired application. Furthermore, in the cases of interconnection networks involving a high interconnection volume the design of digital holographic elements benefits from being system dependent. This means that the task can be regarded as a wave-front synthesis under a set of constraints including both architectural and manufactural considerations.

In hologram-cascaded architectures,¹ which are addressed here, two main cases can be considered. The input hologram array generates diffraction patterns containing either the desired wave fronts addressing the next holographic plane directly or the input signals that will be processed by an intermediate optical element or subsystem addressing the next holographic plane. The first case has been widely studied¹ and is not of concern here. The second case,

which deals with hybrid systems, is of great interest for implementing large reconfigurable volume interconnections.²

Proper constraints related to this type of architecture, such as diffraction efficiency, space-bandwidth product (SBWP), and cross-talk limitations, have been described in Ref. 2. Here in particular we focus on the analysis of the constraints related to holographic-encoding techniques. In particular the reconstructed signal has to belong simultaneously to the set \mathcal{E} of wave fronts reconstructible by digital holograms and the set, \mathcal{E}' , of signals that can be converted by the available processing element into the suited output wave fronts. Apart from a minority of encoding methods such as direct binary search,³ the process should begin with a known signal to find a corresponding digital hologram. In our case with regard to previous system considerations, no signal is known *a priori*. This means that a choice should be made from the elements belonging to both the sets \mathcal{E} and \mathcal{E}' . However, knowing that the reconstructed optical signal can never be identical to the desired input signal, we must choose the latter such that the reconstructed signal remains in the set \mathcal{E} . In other words the resulting error must be permitted by the processing element itself.

In this paper we present two types of intermediate processing elements, both of them being sensitive to the light intensity. First, we consider the case of a bistable optically addressed spatial light modulator (BOASLM), whose role is to detect and regenerate the information directed from the input holographic ar-

The authors are with the Groupe Optique et Systèmes de Communication, Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications de Bretagne, BP 832, Brest Cedex, 29285, France.

Received 12 July 1993; revised manuscript received 31 January 1994.

0003-6935/94/235472-10\$06.00/0.

© 1994 Optical Society of America.

ray, so that it is presented to the next beam-steering stage with the correct shape and magnitude. Second, we study the case of a photodiode array by electrically selecting a switchable multifaceted hologram array. These two solutions are discussed, mainly in terms of hologram SBWP saving.

2. Principle of the Node-Based Architecture

The basic form of the proposed optical architecture, which involves three cascaded data planes,² is shown in Fig. 1. The input plane is made with a holographic array, H_1 , illuminated by a two-dimensional laser diode array. The intermediate plane contains the interconnection nodes, while the output plane operates as a two-dimensional detector. The first holographic plane is used to connect each input (i, j) with state A_{ij} to a particular set of nodes \mathcal{N}_{ij} . At the kl th node the second step consists of generating at the output plane the different spatial responses $A_{ij}\Phi_{ijmn}$ multiplied by the node weight, W_{kl} . For this purpose we use a local multifacet hologram, H_{kl} , which is designed for this particular node such that the ij th face of H_{kl} , illuminated by a local replication of A_{ij} , produces $A_{ij}\Phi_{ijmn}$ at the m th output point.

As detailed in Ref. 2, such an architecture suffers from significant energy loss owing to beam division. The energy of the optical waves reaching the holographic facets of H_2 could be insufficient, especially when we consider that the latter acts as a beam splitter for the next stage. Instead of cascading of the two holographic layers, it has been proposed that an intermediate regenerative element² be introduced. Therefore the plane of nodes is made up of three layers (see Fig. 7 of Ref. 2). The first layer is an optically addressed spatial light modulator (OASLM) whose role is to detect and regenerate the information directed from the input plane; the incoming interconnection patterns are memorized on the OASLM in the form of intensity patterns. The device is then read out with a second uniform beam, and the node responses are generated at the output plane by the multifaceted hologram H_2 , modulated by the weight matrix W , which is input by the pixel transmittance of an electrically addressed liquid-crystal spatial light modulator.

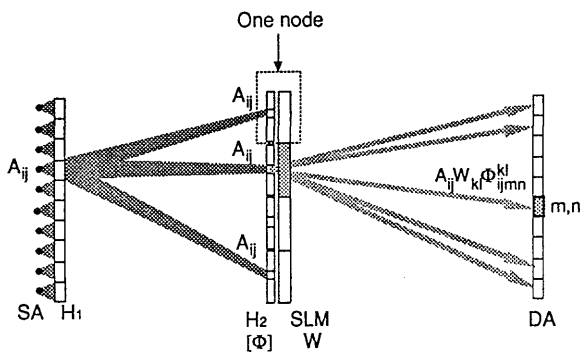


Fig. 1. Node-based interconnection network and the principle of the free-space optical implementation: SA, source array; H_1 , H_2 , hologram arrays; SLM, spatial light modulator; DA, detector array.

3. Basic Considerations of Digital Holography

Compared with optical holography, digital holography results in a higher degree of flexibility. Furthermore, the design of digital holograms brings out natural degrees of freedom that cannot be exercised by optical processes. However, a few constraints must be considered in every digital holographic situation. These are related essentially to manufacturing problems and architectural considerations.

As is known in both approaches, in which the problem of beam division is of concern, the diffraction efficiency is a major factor that must be taken into account. Two important features have to be considered here.

- (i) High diffraction efficiency: The overall energy incident upon the reconstruction plane must be maximized with respect to the energy illuminating the holographic element.
- (ii) High addressing efficiency: Each holograph facet has to concentrate, as much as possible, the light intensity within the reconstruction plane onto the intermediate processing elements.

A. Constraints on Bandwidth

In this paper we are restricted to Fourier holography; moving up to Fresnel holography is straightforward. In this framework the relationship between the hologram of complex amplitude $f(x, y)$ and its diffraction pattern in the reconstruction plane is given by a Fourier-transform relationship, $f(x) \xrightarrow{TF} F(u, v)$.

Given that the hologram is a physical element, it should have a finite extent. Then, the signal to be reconstructed has to fulfill the stringent band-limited condition:

$$\Delta F < \infty. \quad (1)$$

This constraint is imposed on each input holographic facet, with all the facets sharing a common reconstruction field.

In addition, the complex amplitude of the spectrum $F(u, v)$ has to be quantified to satisfy the manufacturing process, i.e., only few levels are possible. With an amplitude hologram⁴⁻⁸ we should at first convert the spectrum to a positive real function, smoothed for limiting the encoding noise introduced. With regard to the importance of the diffraction efficiency we suggest turning phase holograms.^{4,9-11} In this case the encoding step consists of converting the spectrum to a complex function having a uniform magnitude without introducing considerable encoding noise:

$$|F(u, v)| \approx \text{const.} \quad (2)$$

The conversion of the analog spectrum verifying constraints (1) and (2) into a hologram having n phase levels is an additional requirement:

$$F(u, v) \propto \exp[i\psi(u, v)], \text{ with } \psi(u, v) = k\Delta\psi, \quad (3)$$

where $k = \{1, 2, \dots, n\}$ and $\Delta\psi = 2\pi/n$. This constraint depends strongly on the manufacturing process.

B. Constraints on Spectrum Smoothing and Filtering

The three constraints mentioned above are related to the Fourier transform of the signal to be reconstructed; therefore to satisfy them, we should undertake modifications over the signal itself. However, this is valid only when the intensity is of concern, as in our application. In this situation the phase is seen to be a free parameter that can be used to smooth the power spectrum, as has been demonstrated in Ref. 12. Starting from a desired intensity distribution $m(x, y)$, when we consider an input function $f(x, y) = [m(x, y)]^{1/2}$, we see that the corresponding spectrum often has a large dynamic range.

In order to avoid this problem, we have to add a suitable phase distribution to the positive real function $f(x, y)$. Several methods have been considered in the literature.¹³⁻¹⁵ Generally a random phase is superimposed onto the object data; this corresponds to diffuse illumination in the case of optical holography.¹⁶ In the last case, band-limited constraint (1) is seriously violated because the spectral distribution is spread over the entire Fourier plane. According to the effective bandwidth definition proposed by Papoulis in the one-dimensional case,¹⁷

$$\begin{aligned} \Delta F &= 4\pi^2 \int_{-\infty}^{+\infty} u^2 |F(u)|^2 du \\ &= 2\pi \int_{-\infty}^{+\infty} \left\{ \left[\frac{da(x)}{dx} \right]^2 + \left[a(x) \frac{d\varphi(x)}{dx} \right]^2 \right\} dx, \end{aligned}$$

with $f(x) = a(x)\exp[i\varphi(x)]$ and $\int_{-\infty}^{+\infty} |f(x)|^2 dx = 1$. Therefore the second term in the integral, involving a phase derivative, is a determining factor when a random phase is used. This term is zero for $f(x, y) = [m(x, y)]^{1/2}$. A diffuser must be superimposed onto $f(x)$ but without violation of bandwidth constraint (1). This can be achieved by a low-pass filtering of the phase variation, resulting in a colored power distribution in the hologram plane.

Theoretically it is not possible to fulfill constraints (1) and (2) simultaneously for a fixed output signal.¹⁸ However, this can be reached with high accuracy by exploitation of the degrees of freedom on the reconstruction signal. The following section is devoted to considering this point.

4. Constraints and Degrees of Freedom

In such situations the solution hinges on two successive steps. The first consists of finding and formulating the constraints and the degrees of freedom. In a second step a logical order to apply the degrees of freedom, for the purpose of satisfying the constraints, should be introduced. In practice, degrees of freedom can be found mainly in the reconstruction plane, whereas constraints appear in both the hologram and the reconstruction plane.

A. Constraints

In addition to constraints (1)–(3) that are related to the hologram encoding, others arise in the reconstruction plane, depending on the choice of the intermediate processing element. Here we consider two cases: the BOASLM and the photodiode array.

The BOASLM acts as an optically programmable shutter. The first layer is a photoconductive layer driving a ferroelectric liquid-crystal cell.¹⁹ The use of a bistable ferroelectric liquid crystal permits both threshold and memorization operations. Owing to its memory ability, writing and reading of the BOASLM can be performed sequentially, therefore permitting energy regeneration.² In practice, however, the BOASLM is not a perfect hard-clipping operator and requires a tolerance interval $[i_1, i_2]$ for the threshold to ensure a clear separation between the switched and the unswitched states. This can be described by the following conditions:

$$\begin{aligned} i < i_1 &\Rightarrow T(i) = 0, \\ i_1 \leq i \leq i_2 &\Rightarrow 0 \leq T(i) \leq 1, \\ i \geq i_2 &\Rightarrow T(i) = 1, \end{aligned} \quad (4)$$

where i is the (input) light distribution illuminating the BOASLM and $T(i)$ is the output detected distribution (e.g., the contrast ratio). Permitting this interval relaxes the required constraints on the BOASLM. In the Fourier plane the intensity corresponding to the activating elementary zones must exceed the level $i_2 = i_0 + \frac{1}{2}\Delta i_0$, referred to as the lower-limit constraint [Eq. (5)], whereas it must also fall under the higher limit $i_1 = i_0 - \frac{1}{2}\Delta i_0$ over the rest of the second hologram plane, which we call the upper-limit constraint [Eq. (6)]. The last two constraints have to be satisfied accurately (Fig. 2); otherwise, parts of the

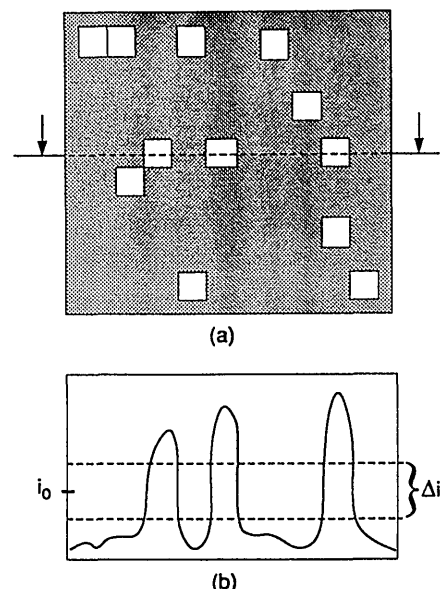


Fig. 2. Threshold conditions: (a) geometry of the activation addressing areas, (b) light distribution corresponding to the cross section indicated by the dashed line in (a).

device related to holograms to be activated will not be illuminated correctly, while parts corresponding to holograms to be neutralized (i.e., not to be activated) will be partially activated. To summarize, we must have

$$m(x, y) \geq i_0 + \frac{1}{2}\Delta i_0 \quad \text{over the activation area,} \quad (5)$$

$$m(x, y) \leq i_0 - \frac{1}{2}\Delta i_0 \quad \text{over the neutralizing area.} \quad (6)$$

With respect to the basic architecture considered in Section 2 and because many input holograms can be activated simultaneously, we should consider the case of light-wave superpositions on neutralized addressing areas that are due to cross talk generated by each activated input hologram; otherwise, constraint (6) will be violated. In practice these considerations lead us to even more restrictions on the threshold level expressed by constraint (4), resulting in the definition of a new tolerance interval Δi (instead of Δi_0), which takes the cross-talk function into account. The tolerance interval must be such that the light intensity resulting from wave superpositions remains less than the upper limit over the neutralized areas and more than the lower limit over the activating areas. By considering the worst case, we come to the definition of the cross-talk constraint that determines the input hologram fan-out maximum acceptance:

$$I_C = \frac{i_0 + \frac{1}{2}\Delta i}{i_0 - \frac{1}{2}\Delta i} \geq \text{fan-out,} \quad (7)$$

which is referred to as the cross-talk constraint. The worst case corresponds to the in-phase superposition of noise. This means that the study has to be completed by considerations on the source coherence. We are restricted here to the case of incoherent illumination at the input plane. This assumption is valid because none of the input holograms can activate the same elementary hologram of the second holographic plane (node-plane architecture).

The second alternative that was considered concerns the use of a photodiode array. In regard to the previous solution, constraints (1)–(4) remain the same. A tolerance interval is required as in the case of the BOASLM. The major difference concerns the intensity response in the different areas of the addressing field; i.e., the fifth and sixth constraints change as follows:

$$\frac{1}{S} \int_{D_{kl}} m(x, y) dx dy \geq i_0 + \frac{1}{2} \Delta i \quad \text{over the activation areas,} \quad (8)$$

$$\frac{1}{S} \int_{D_{kl}} m(x, y) dx dy \leq i_0 - \frac{1}{2} \Delta i \quad \text{over the neutralizing areas,} \quad (9)$$

where S is the photosensitive surface and D_{kl} is the kl th element of the photodiode array.

B. Degree of Freedom

Again, two cases must be considered, depending on the model of photodetection at the node plane. As the BOASLM is sensitive only to the incoming light beam intensity, the phase can be used as a free parameter contributing toward satisfying the constraints related to the power spectrum smoothing.⁸ This degree of freedom, referred to as phase freedom, F_1 , is valid over the entire reconstruction plane.

Over the activating areas, the intensity is free whenever it is beyond the threshold $i_0 + \frac{1}{2}\Delta i$, therefore defining a second degree of freedom, F_{2A} . Outside the activating areas, the intensity can vary freely under an upper limit of $i_0 - \frac{1}{2}\Delta i$ value (F_{3A}).

In the second case, insofar as a photodiode array is concerned, the first degree of freedom, F_1 , remains unchanged, whereas F_{2A} and F_{3A} are modified. Thus $m(x, y)$ is free if

$$\frac{1}{S} \int_{D_{kl}} m(x, y) dx dy \geq i_0 + \frac{1}{2} \Delta i \quad \text{over the activation areas,} \quad (10)$$

$$\frac{1}{S} \int_{D_{kl}} m(x, y) dx dy \leq i_0 - \frac{1}{2} \Delta i \quad \text{over the neutralizing areas,} \quad (11)$$

In addition, taking into account topological and architectural information permits us to consider additional degrees of freedom, referred to as topological (or geometrical) freedoms degrees (F_4). For example, a gap can be introduced between the elementary holograms of H_2 , therefore freeing the intensity in this area (the phase remaining free). Figure 3 shows the spatial distribution of the degrees of freedom in the BOASLM case.

Last, a freedom degree can be added outside the addressing field containing both activation and neutralizing areas (which has to be spatially separated from the zeroth order). This freedom degree consists here of the liberty of choice of the amplitude information (F_5).^{20,21}

The previous remark remains true in the case of the photodiode array. Nevertheless, the discussion

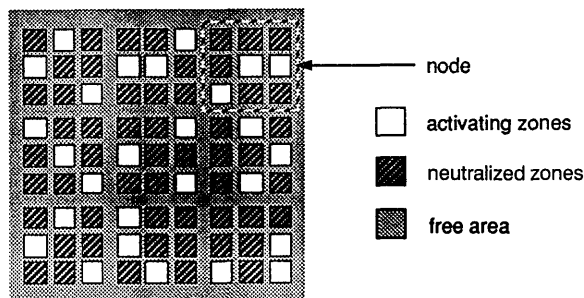


Fig. 3. Topology of the node plane in the BOASLM case.

can be taken further, as the physical link between the hologram-addressing mode and the reading mode can be broken down, both from an energy and from a spatial point of view. The signal detected by the photodiode can be used to switch a matrix of optical shutters activating the desired output holograms. This means that the sensor size has no further effect on hologram size. Furthermore, this implies that the scaling of the photodiode array is independent of the scaling and the topology of the second holographic plane. An important gain in terms of optical implementation can be obtained in this case. This alternative is detailed in Section 6.

5. Digital Hologram Design

In order to satisfy all the constraints mentioned, we should begin to order them. Obviously the third constraint must be treated before constraints (1) and (2). Then, before starting the quantization process, we have to ensure a band-limited condition. In addition, the quantization of a nonsmoothed spectrum is likely to introduce tremendous noise in the reconstruction plane. For the same reasons, constraints (4)–(6) cannot precede constraints (1) and (2) during their satisfactory procedure. Thus the first two constraints must be treated first, as they are the last dependent ones. This does not exclude, however, other constraints being considered simultaneously with constraints (1) and (2). This depends strongly on the algorithm applied, on the one hand, and requires more degrees of freedom on the other. A calculated object-independent diffuser turns out to be a suitable alternative for the first two constraints.

Next, we turn to constraints (4)–(6), while preserving constraints (1) and (2). The method of direct binary search may be used here, introducing the third constraint from the beginning. Starting from a random prequantized hologram, the procedure aims at converging toward a final hologram through the minimization of a cost (error) function.³ An appropriate choice of an error criterion must be made to ensure any convergence. In our particular application we also face the problem of computing time. A two-level direct binary search implies the reconstruction of a twin object, thus seriously violating the condition of high diffraction efficiency. Moving up to a four-level encoding increases further threefold to fourfold the computing time. During the coding, all samples of the optimization zone must be covered to calculate the error corresponding to one-pixel modification. This implies a significant computing time problem especially in our case, in which the optimization zone is considerable and many input holograms have to be designed. The error-diffusion method²² cannot be used without a radical modification; because we are not concerned with a well-defined signal, we cannot diffuse the error from one pixel to its surroundings.

The iterative Fourier-transform algorithm (IFTA)^{23,24} turns out to be appropriate in such applications.

The idea of balancing iteratively between the hologram and the reconstruction plane amply justifies this choice. Constraints can be integrated easily, and degrees of freedom can be freely capitalized; in other words, this method is open and flexible. To force the convergence, one can set aside constraint (3) and treat it separately. In regard to constraint (2) the latter method not only maintains it, improves it. This is because degrees of freedom can be set in current step to guide the power spectrum to a more uniform distribution. However, this is impossible if we start from a well-defined signal. Equally, it is not attainable if the quantization constraint is integrated simultaneously. An averager can be used to smooth the moduli of the spectrum. Without changing the corresponding phase, it introduces a distortion on the reconstruction pattern. Since it is not easy to change the phase appropriately to avoid such a distortion, we can act directly on the reconstructed signal by compensating for the error introduced by taking lower values beyond the lower limit $i_0 + \frac{1}{2}\Delta i$ on the activation zones, satisfying constraint (5). In this way the suitable spectrum phase will be reached automatically.

The last stage is devoted to considering the constraint (3). As the latter is classed the last in the constraint priority list and is also the most demanding, it is worth devoting a large number of available degrees of freedom to it. We should use the minimum of the available degrees of freedom in the previous stages in order to give a large zone of compensation in this step. It is suggested that we extend, as far as possible, the tolerance interval in the second stage for the purpose of granting the list step with a large error zone.

Taking into account all these considerations, we give a flow chart of the proposed iterative algorithm in Fig. 4, established in the BOASLM case. Regarding the second choice for the processing element (i.e., the photodiode array), the consideration of degrees of freedom that are due to the topological configuration remains valid. As constraints (5) and (9) are de-

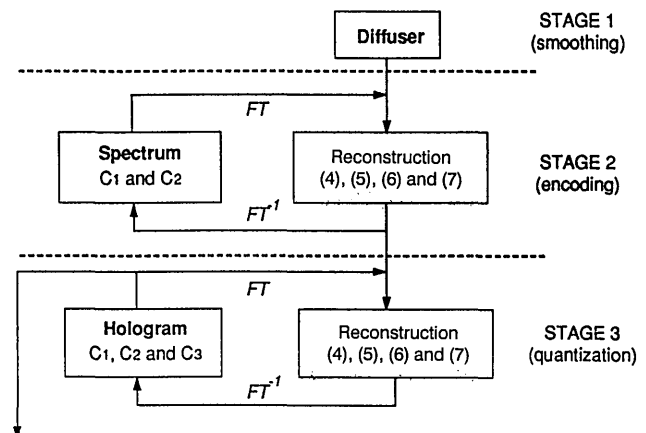


Fig. 4. IFTA-based general algorithm tackling optimization problems in three steps (only the constraints have been represented here).

scribed by integrals, it appears difficult to control them. The same is true for the exploitation of the degree of freedom F_{2B} and F_{3B} .

A first solution consists of starting from a well-defined signal chosen from $\mathcal{E}' \cap \mathcal{E}$. We can consider a binary signal or a low-pass version of the latter.¹⁸ The corresponding flow chart is therefore simplified. Stage two is no longer necessary, and constraint (4) need not be considered during stage 3. A signal restoration is added to the reconstruction stage. This case has been treated in many references.^{9,18} Instead of considering binary functions, we can use the sinc function, giving smooth spectra as well. Naturally the above solution could not be proposed in the BOASLM case, because the occurrence of any speckle in one activating zone alters the spatial switching process in this area, and consequently the associated hologram will not be activated correctly.

A second solution adapted to both the OASLM and the photodiode case can be adapted by consideration of the flow chart of Fig. 4. For the OASLM, lower intensity values should be taken beyond the (lower) limit $i_0 + \frac{1}{2}\Delta i$ on the activation areas, whereas intensity levels over the higher limit on the neutralizing zones will be decreased under this level. The task examines each point of the addressing field. For the photodiode array, constraints (8) and (9) and degrees of freedom (10) and (11) can be replaced, respectively, by constraints (5) and (6), and by F_{2A} and F_{3A} , where tolerance interval constraint (4) can be relaxed. Considering a few input holograms with low fan-out (with the assumption that the cross talk is not dominant) the latter constraint can be neglected, i.e., $\Delta i = 0$. As the overall light intensity over one cell is considered, a suitable tolerance interval Δi is produced automatically. Regarding the original diagrams for this particular case, constraint (4) is no longer relevant at each reconstruction step.

Finally, a third solution may be used such that the constraint description by integrals can be faced. Hence it is suggested that we sum the moduli of the samples over each activating cell and calculate the average value by dividing the sum by the sample number over one cell. If the average value i_{av} is less than the lower limit $i_0 + \frac{1}{2}\Delta i$, the samples having moduli under this limit will be taken beyond it, fulfilling constraint (8). This consideration is illus-

trated in Fig. 5 in one dimension:

$$\int_{D_k} m(x)dx > \int_a^b \left(i_0 + \frac{1}{2}\Delta i\right)dx + \int_b^c m(x)dx + \int_c^d \left(i_0 + \frac{1}{2}\Delta i\right)dx.$$

After taking the intensity values over the interval $[b, c]$ beyond the lower limit $i_0 + \frac{1}{2}\Delta i$, we obtain

$$\frac{1}{S} \int_{D_k} m(x)dx > \frac{1}{S} \int_a^d \left(i_0 + \frac{1}{2}\Delta i\right)dx = i_0 + \frac{1}{2}\Delta i.$$

The same process can be exercised for the upper limit constraint (g). This does not introduce a significant computing time compared with the solution chosen for the BOASLM. Thus it is not necessary to test whether the intensity of each sample exceeds the lower limit if the average value over the activating cell is greater than this limit, whereas this test must cover all samples of the cell for the case of the BOASLM. However, the computing of the average value is not necessary in the latter case.

In conclusion, it appears that degrees of freedom can be fully exploited. The third method turns out to be the most effective for architectures with high interconnection capabilities. The second one can be used only for a few input holograms. By the first solution the contrast between activated and neutralized zones is not controllable, and therefore this method seems to be inappropriate for highly interconnected networks.

6. Experimental Results

Considering the architecture described in Section 2, we simulated reconstruction patterns for an input holographic array H_1 containing 9×9 holograms. Each input hologram was encoded originally on 512×512 pixels with a fan-out of 81 (9×9). Holograms were calculated with the IFTA technique with four-phase levels. The number of independent addressable elements in the reconstruction plane is equal to 512×512 , and the multifaceted holographic plane H_2 was made up of 9×9 nodes, each of them containing 3×3 holographic facets. The contrast ratio between the activated and neutralized input holograms was assumed to be infinite. Under the assumption that the input hologram array is illuminated by a spatially incoherent source, two cases were considered.

First is the case of a BOASLM, with an input hologram fan-out of 81. This fan-out value imposes the choice of i_0 and Δi so that cross-talk constraint (7) is verified. In practice, i_0 and Δi are determined experimentally. Considering an I_C value of 100, we calculated the BOASLM parameters, giving a lower limit $i_0 + \frac{1}{2}\Delta i$ equal to 0.4 and an upper limit $i_0 - \frac{1}{2}\Delta i$ equal to 0.004, for a normalized light intensity. In

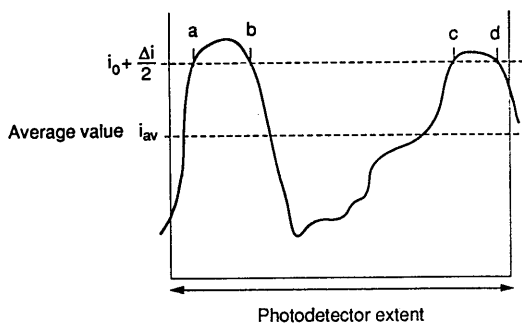


Fig. 5. Intensity distribution over one activation area in the photodiode case.

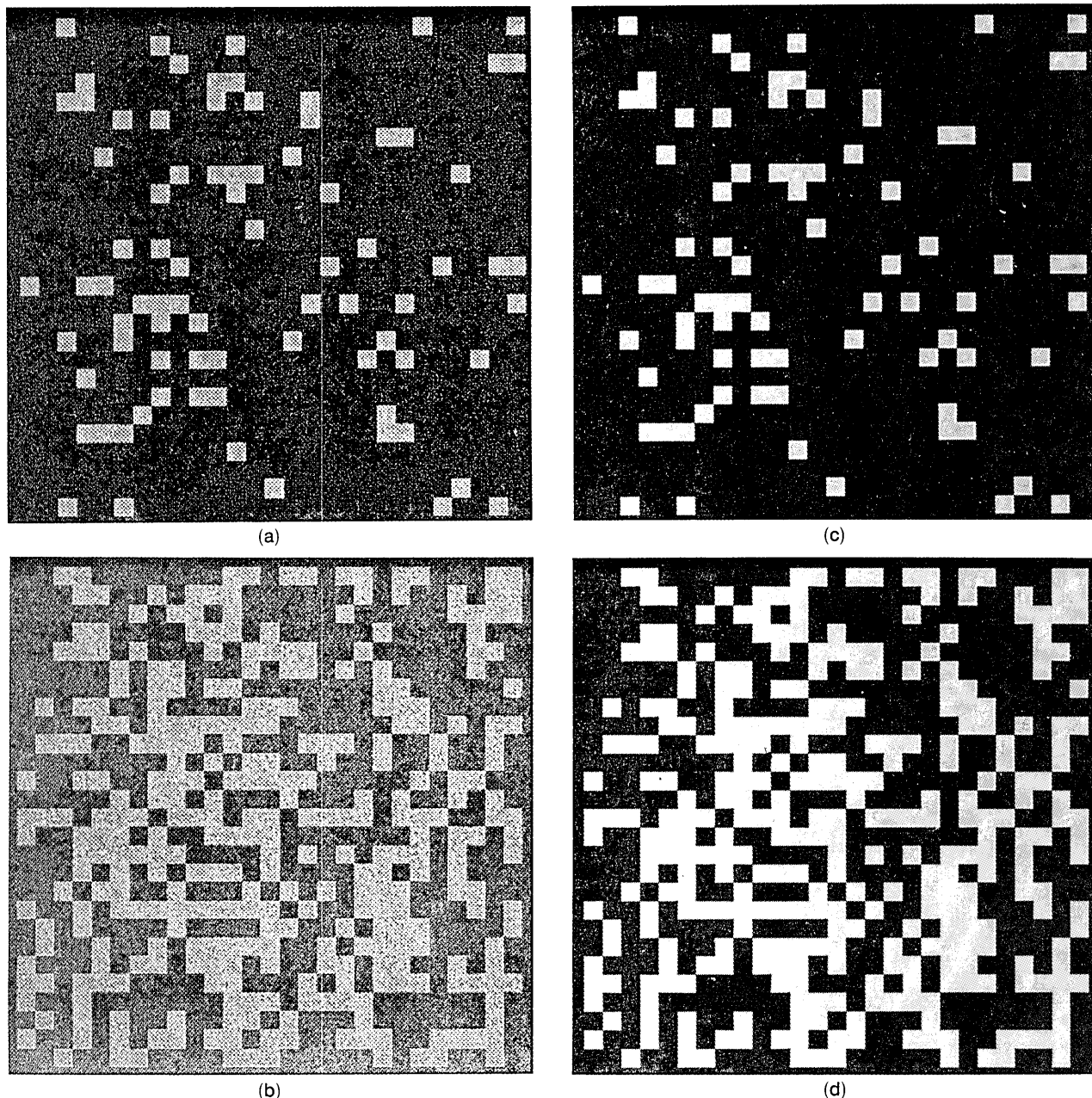


Fig. 6. Simulations of reconstructed intensity distributions by use of one input hologram encoded with 512×512 pixels (a) before and (b) after thresholding by the BOASLM. The first order of the reconstruction is extended over 243×243 pixels. Each addressing area is represented by 9×9 pixels. (c), (d) Case of four input holograms diffracting in the same reconstruction plane (c) before and (d) after thresholding by the BOASLM.

this case, no false activation occurs in the plane of nodes. Figure 6 shows the reconstruction plane before and after the BOASLM thresholding. Concerning the SBWP, we considered that a reconstructed spot size of 9×9 pixels was sufficient for addressing and consequently for reading a holographic facet correctly. Taking all these considerations into account permits a complete useful reconstruction plane of 243×243 independent elements.

In the case of the photodiode array, as previously mentioned, the wave-front shape is less demanding in terms of SBWP. A spot size of 3×3 pixels was

considered here with a one-pixel photodiode gap. In the same manner the choice of i_0 and Δi is less restrictive because more degrees of freedom are available. If we consider for example, a lower limit equal to 0.5 and an upper-limit equal to 0.0025, then for a normalized light intensity, this permits a potential fan-out of 200 that can be accepted for each input hologram. The second consequence is the saving in SBWP for the first holographic plane. Because only 108×108 independent elements are necessary in the reconstruction plane, the input holographic facets can be encoded on less than 256×256 pixels.

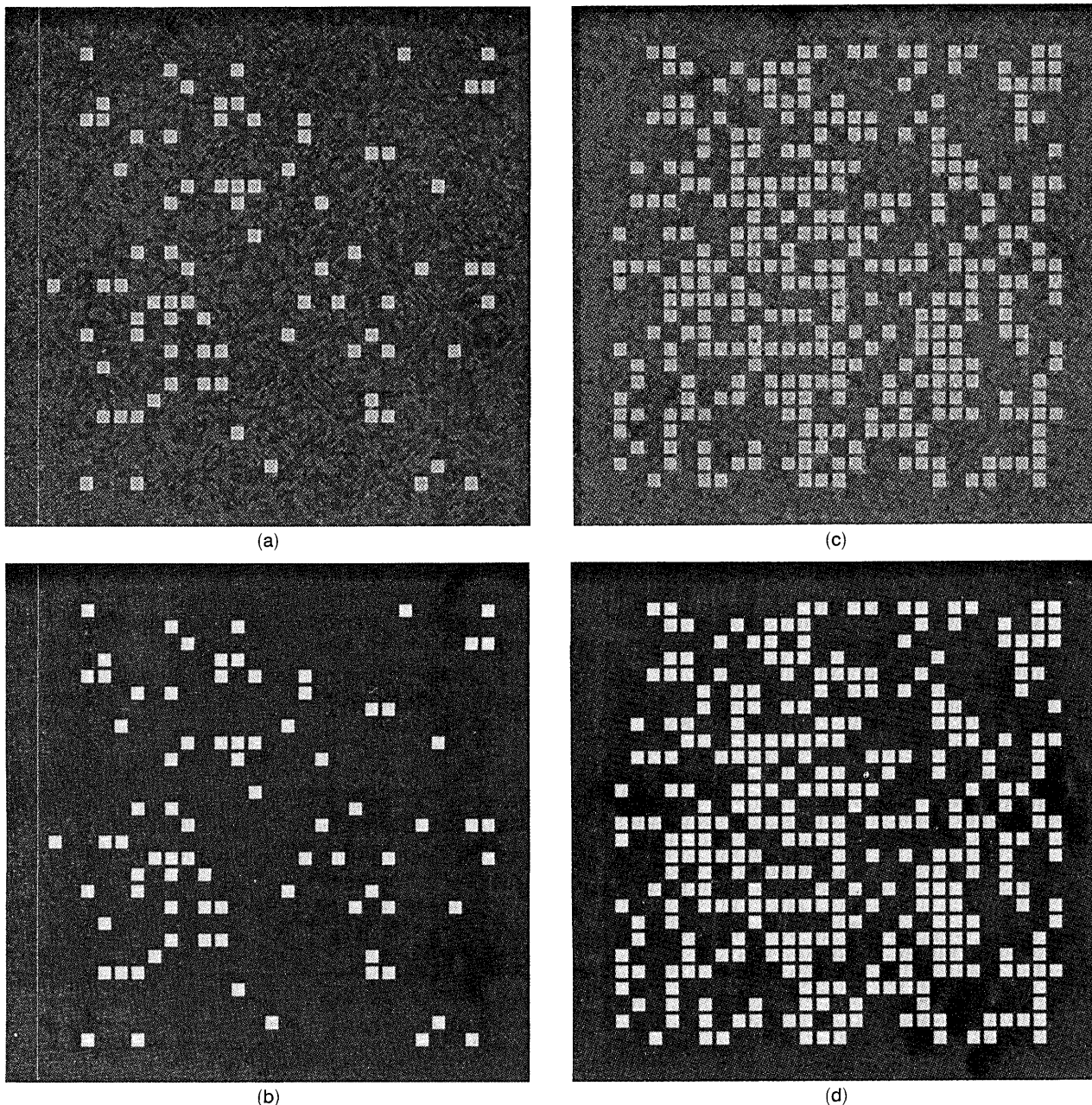


Fig. 7. Simulations of reconstructed intensity distributions by use of one hologram encoded with 256×256 pixels (a) before and (b) after thresholding by the photodiode array. The first order of the reconstruction is extended over 108×108 pixels. Each addressing area is represented by 3×3 pixels. A gap of one pixel is used. (c) (d), case of four input holograms diffracting in the same reconstruction plane (c) before and (d) after thresholding by the photodiode array.

Figure 7 shows the reconstruction before and after the photodiode detection, with the SBWP reduction (256×256) taken into account.

In regard to the computing time, the IFTA was implemented on a DEC VAX-station 4000/60 computer. The convergence was obtained after 30 iterations for a total duration of ~ 10 h when four input holograms were considered. The same results would have been obtained with a four-phase-level DBS in a few hundred days.

The diffraction efficiency is calculated as a ratio between the intensity in the activation zones and the

intensity over the entire reconstruction. A diffraction efficiency of $\sim 71\%$ for the BOASLM and $\sim 63\%$ for the photodiode array is obtained. The lower diffraction efficiency corresponding to the photodiode array is caused by the introduction of the gap. This can be understood by the fact that considerable energy is trapped between neighbor activation zones. For one hologram a trapped energy of $\sim 14\%$ was measured. However, giving up the gap fortifies the tolerance interval constraint and consequently reduces the interconnection capacity. Thus, depending on the application, a compromise between diffrac-

tion efficiency and interconnection capacity has to be undertaken.

7. Conclusion

In this paper we have proposed a general approach for computing digital holograms to be used in a particular hybrid three-dimensional interconnection architecture. The calculation of the digital hologram is performed to suit both manufacture and system requirements. The principle of the method is based on the use of particular degrees of freedom in order to satisfy hologram and signal achievement constraints. As a first result, it has been shown that degrees of freedom can be found mainly in the reconstruction plane.

Algorithms to calculate system-dependent holographic elements have been proposed and applied to two special system configurations. At first, a BOASLM was considered. Three stages were suggested to calculate a hologram suiting the switching requirements of this processing element. The first step corresponds to calculating a suitable band-limited phase function. The second step is devoted to satisfying the switching conditions of the BOASLM according to a fixed topological distribution of elementary output holograms to be activated. Finally, an iterative procedure is added for performing the quantization of the hologram. The study emphasizes the fact that a tolerance interval for switching has to be permitted to include cross-talk considerations. In particular we show that fan-out functions can be included in the definition of the tolerance interval of the photosensor.

Second, we deal with a photodiode array as processing element, which is shown to offer more degrees of freedom. Here, we suggest one method that starts from a chosen designed signal and a second one that turns toward the solution proposed for the BOASLM, eliminating the tolerance interval constraint. A third solution is considered, handling the description of constraints and degrees of freedom by integrals. In addition, it is shown that a gain in terms of degrees of freedom, for the input hologram plane, can be obtained here if the second hologram-plane addressing mode can be decoupled from the reading one. This is the major conclusion of the study. If the optical hologram cascading with BOASLM permits energy regeneration and a possible reduction of the cross-talk, from a SBWP point of view this solution is demanding and the use of degrees of freedom is limited. If an extra size and scale breakdown is obtained, as in the case of the photodiode array, an important reduction of the necessary SBWP is possible, offering more degrees of freedom for inclusion of further device and system constraint considerations.

Finally, the study shows that the iterative, Fourier-transform algorithm turns out to be well suited in such situations; this is due to balancing between the hologram and its reconstruction plane. This capability facilitates the consideration of constraints and an

optimal use of the degrees of freedom. In regard to this last point it is important to mention that optimizing the digital holographic element and photosensor pair has been considered only in the sense of taking into account the detector considerations. Conversely it could be imagined that constraints both on the holographic encoding and the input plane could induce a special design of the detector regarding both its nonlinearity, geometry, and topology. Such a consideration seems to be difficult to achieve in practice, but it demonstrates the notion of degrees of freedom and encoding constraints can substituting each other, depending on the side on which the constraints are placed.

The authors wish to thank Patrick Berthelé and Yves Defosse, from Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications de Bretagne, for valuable discussions.

References

1. B. K. Jenkins, P. Chavel, R. Forchheimer, A. A. Sawchuck, and T. C. Strand, "Architectural implications of digital optical processor," *Appl. Opt.* **23**, 3465-3474 (1984).
2. B. Fracasso and J.-L. de Bougrenet de la Tocnaye, "Node-based reconfigurable volume interconnections. 1. Principles and optical design," *Appl. Opt.* **33**, (1994).
3. M. A. Seldowitz, J. P. Allebach, and D. W. Sweeney, "Synthesis of digital holograms by direct binary search," *Appl. Opt.* **26**, 2788-2798 (1987).
4. D. C. Chu and J. R. Fienup, "Recent approaches to computer-generated holograms," *Opt. Eng.* **13**, 189-195 (1974).
5. N. C. Gallagher, Jr., and J. A. Bucklew, "Nondetour phase digital holograms: an analysis," *Appl. Opt.* **19**, 3856-3862 (1980).
6. R. A. Gabel, "Reconstruction errors in computer generated binary holograms: a comparative study," *Appl. Opt.* **14**, 2252-2255 (1975).
7. B. R. Brown and A. W. Lohmann, "Computer-generated holograms," *IBM J. Res. Dev.* **14**, 160-168 (1969).
8. F. Wyrowski, "Diffraction efficiency of analog and quantized digital amplitude holograms: analysis and manipulation," *J. Opt. Soc. Am. A* **7**, 383-393 (1990).
9. M. Bernhardt, F. Wyrowski, and O. Bryngdahl, "Iterative techniques to integrate different optical functions in a diffractive phase element," *Appl. Opt.* **30**, 4629-4635 (1991).
10. F. Wyrowski, "Diffraction efficiency of elements: iterative calculation of quantized, blazed phase structures," *J. Opt. Soc. Am. A* **7**, 961-969 (1990).
11. H. Bartelt, "Computer-generated holographic component with optimum light efficiency," *Appl. Opt.* **23**, 1499-1502 (1984).
12. F. Wyrowski and O. Bryngdahl, "Speckle-free reconstruction in digital holography," *J. Opt. Soc. Am. A* **6**, 1171-1174 (1989).
13. W. J. Dallas, "Deterministic diffusers for holography," *Appl. Opt.* **12**, 1179-1187 (1973).
14. R. Br uer, F. Wyrowski, and O. Bryngdahl, "Diffusers in digital holography," *J. Opt. Soc. Am. A* **8**, 572-578 (1991).
15. H. Akahori, "Comparison of deterministic phase coding with random phase coding in terms of dynamic range," *Appl. Opt.* **12**, 2336-2343 (1973).
16. E. N. Leith and J. Upatnieks, "Wave-front reconstruction with diffused illumination and three-dimensional objects," *J. Opt. Soc. Am.* **54**, 1295-1301 (1964).
17. A. Papoulis, *The Fourier Integral and Its Applications* (McGraw-Hill, New York, 1968), pp. 62-63.
18. R. Br uer, F. Wyrowski, and O. Bryngdahl, "Signal synthesis

- for diffractive optical elements in hybrid systems," *Appl. Opt.* **30**, 3307–3314 (1991).
19. J.-L. de Bougrenet and J. R. Brocklehurst, "Parallel access read/write memory using an optically addressed ferroelectric spatial light modulator," *Appl. Opt.* **30**, 179–180 (1991).
 20. F. Wyrowski and O. Bryngdahl, "Digital holography as part of diffractive optics," *Rep. Prog. Phys.* **54**, 1481–1571 (1991).
 21. O. Bryngdahl and F. Wyrowski, "Digital holography: computer-generated holograms," *Prog. Opt.* **28**, 1–85 (1990).
 22. S. Weissbach and F. Wyrowski, "Error diffusion procedure: theory and applications in optical signal processing," *Appl. Opt.* **31**, 2518–2534 (1992).
 23. J. R. Fienup, "Iterative method applied to image reconstruction and to computer-generated holograms," *Opt. Eng.* **19**, 297–305 (1980).
 24. F. Wyrowski and O. Bryngdahl, "Iterative Fourier-transform algorithm applied to computer holography," *J. Opt. Soc. Am. A* **5**, 1058–1065 (1988).

Design and characterization of a liquid-crystal spatial light modulator for a polarization-insensitive optical space switch

Patrick Berthelé, Bruno Fracasso, and Jean-Louis de Bougrenet de la Tocnaye

We report preliminary results concerning a free-space optical switch between single-mode fibers with a ferroelectric liquid-crystal (FLC) spatial light modulator (SLM). In particular, we show experimentally that such a device can operate in a polarization-insensitive manner. The influence of the geometrical and physical features of the FLC SLM on the overall performance of the optical fiber switch are also discussed.   1998 Optical Society of America

OCIS codes: 060.2430, 090.1970, 060.1810, 070.6110, 200.4650, 230.3720.

1. Introduction

Within the framework of optical transport networks based on wavelength-division multiplexing, one of the most critical elements is the optical cross-connect. In the near future this optically transparent routing node will be in charge of network management in the optical layer, with potential throughputs of terabits per second. Such transfer rates require optically transparent components for demultiplexing, filtering, and routing the optical channels from the input to the output single-mode (SM) fiber ports operating in the 1550-nm telecommunication window.

At the core of many proposed optical cross-connect architectures¹ is a set of space switches, each operating at a particular wavelength channel. Hence there is a need for space switches operating in the 1550-nm window, wavelength independent or not, with a moderate number (say, eight) of input–output ports. A significant feature is that the device’s switching performance must be polarization insensitive, because the polarization state of the light emerging from a transport fiber is undetermined. As far as network and traffic management of high-bit-rate optical channels is concerned, moderate recon-

figuration rates—typically a few hundreds of microseconds—are required.

Larger capacities (8, 16, and more output channels) can be considered with free-space optics to address two-dimensional (2-D) switching with (i) insertion losses that rarely depend on the number of output channels at (ii) very low cross-talk levels (<–50 dB). These are significant advantages of free-space optics over integrated optics.

Among the possible SM fiber-to-fiber free-space switching schemes, we investigate an expanded-beam dynamic connector in which the routing function is performed by a ferroelectric liquid-crystal (FLC) spatial light modulator (SLM) that acts as a programmable diffractive element. A large-tilt and half-wave plate FLC device is used here to provide polarization-insensitive switching operation.

2. Single-Mode to Single-Mode Free-Space Switch

A. Architectural Considerations

A large number of the free-space interconnection systems between SM channels reported until now have been made with two diffractive stages.² The wave front emerging from an input SM channel is collimated, deflected by the first diffractive plane, redeflected to its original axis by the second hologram, and then focused to be coupled into the output channel mode. This architecture has been extensively studied for fixed interconnections. Recent developments make use of complementary binary computer-generated hologram pairs³ operating in the Fresnel diffraction regime and designed by use of a simulated-annealing procedure. The transposition

The authors are with the Departement d’Optique, Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications de Bretagne, Unit  Mixte de Recherche, Centre National de la Recherche Scientifique 6616, 29285 Brest Cedex, France.

Received 15 April 1998.

0003-6935/98/235461-08\$15.00/0

  1998 Optical Society of America

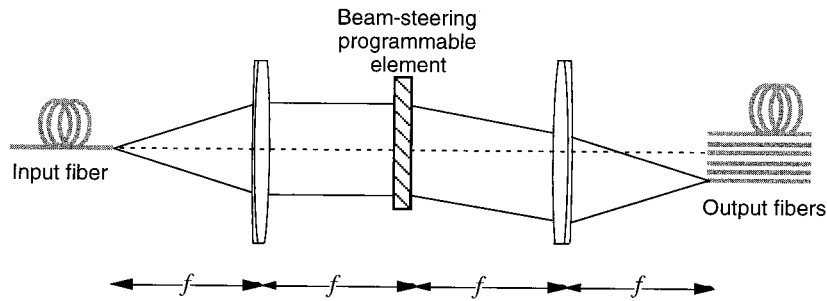


Fig. 1. Free-space 1-to- N optical switch. Although it can be implemented by use of refractive or reflective optics (folded setup), the intermediate shift-invariant interconnect can be stored advantageously in a SLM in the form of a diffractive element.

of such techniques to dynamic interconnections would require a cascaded pair of SLM's that, however, cannot yet compete with fixed holograms in terms of both the space-bandwidth product (SBWP) and the spatial resolution. The programmable SBWP can be increased artificially by use of optically addressed SLM's onto which elementary interconnection patterns are duplicated⁴ or interferometrically engraved.⁵ But then the implementation of the addressing scheme is more complex, with high insertion losses resulting from the limited optically addressed SLM diffraction efficiency.

An alternative to the cascaded architecture is the single-stage structure depicted in Fig. 1. This architecture was proposed⁶ for different applications, but few of them concern space switching between SM fibers.⁷ The idea here is to match the spatial mode of an input SM fiber to the mode of an output SM fiber of the same characteristics by use of an imaging setup with a programmable phase shift at the Fourier plane.

The main advantages of this technique are

- Only one diffractive element is used, thus limiting the defaults inherent in cascaded holograms, such as wave-front distortion, poor diffraction efficiency, and poor spatial alignment. Moderate insertion loss that weakly depends on the number of output channels can thus be obtained.
- The whole SBWP of the SLM—the number of pixels—is dedicated to one deflection.

However, as this imaging scheme is space invariant, only 1-to- N switching can be addressed efficiently. Space-variant N -to- N interconnects can be obtained, as shown in Fig. 2, if N separate 1-to- N modules are stacked in a direction perpendicular to the steering, followed by N optical couplers that collect the information from each column to the appropriate output fiber. This fan-in operation typically induces losses of $3 \log_2 N$ dB. Nevertheless, as the N modules are spatially independent, the overall architecture performance depends mainly on that of a single module. This permits the release of severe optomechanical alignment constraints that occur in many N -to- N free-space architectures.

B. 1-to- N Switch Structure

The basic building block of the space switch is the fiber-to-fiber interconnection setup, shown in Fig. 1. In the first implementation, the output plane is made up of a linear array of SM fibers maintained in a silicon V-groove array. The fibers are equally spaced with an intercore spacing of $250 \mu\text{m}$. According to the manufacturer (Wave Optics), the precision of the fiber-center locations is $\pm 0.5 \mu\text{m}$. The SLM acts as a programmable diffraction grating in the Fourier plane. Although single fan-out connections are considered here, more complex link types such as uniform or weighted-broadcast links can be realized between the input and the output planes by a simple change of the spatial phase code displayed on the SLM.

As mentioned above, the $4f$ architecture used for the connection preserves the characteristics of the input wave front (Gaussian TEM_{00} beam profile) so that the light impinging on the output fiber matches the fiber mode, which is assumed to be the same as the input-fiber mode. This means there is no need for additional coupling microlens arrays at the input and the output planes, simplifying the architecture and the system alignment and reducing losses. By use of an appropriate setup, the fiber-to-fiber launching efficiency is experimentally measured to 0.62% (-2 -dB loss).

The switch capacity, i.e., the maximum number of

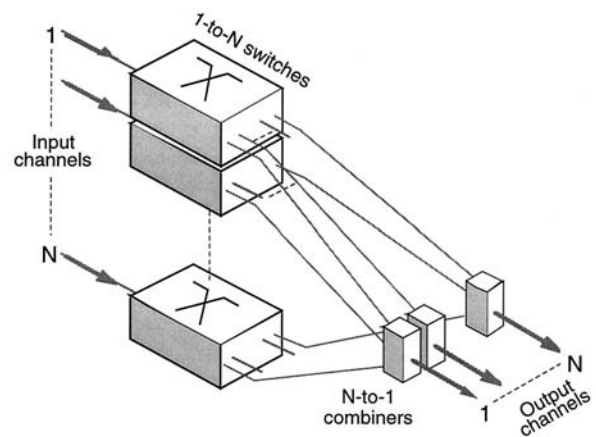


Fig. 2. Architecture of the N -to- N free-space switch.

output fibers that can be addressed with a negligible loss variation (say, 0.1 dB), depends on the SLM's SBWP, the quality of the refractive optics, and the output-fiber geometry. This question is addressed in Section 3. The last point of major importance here is the use of a large tilt angle ($\approx\pi/4$) and a half-wave plate smectic C* liquid-crystal (LC) programmable SLM. With such devices, the SLM's steering capabilities are known to be truly insensitive to the input polarization,^{7,8} provided the cell thickness is matched to the LC birefringence at the design wavelength. In Section 4 we concentrate on the SLM design and characterization.

3. Switch Capacity

In the architecture shown in Fig. 1 the two lenses used for the connections are chosen so that their numerical aperture NA_0 is matched to the numerical aperture of the SM fibers ($NA_f = 0.12$). By adapted we mean that both the lens aberrations and the wavefront aperturing by the SLM in the Fourier plane should be minimized. We chose achromatic doublets with a focal length of 25 mm and a diameter of 12 mm ($NA_0 = 0.23$) owing to their performance and compactness. In the transmissive configuration shown in Fig. 1, the approximate switch dimensions are 20 mm \times 20 mm \times 100 mm. If necessary, this volume could be reduced by half by use of a reflective (folded) $4f$ configuration.

The SLM resolution δx is defined as the array pitch (pixel plus interpixel) and imposes the period sizes of the successive gratings that can be displayed on the SLM. This parameter determines the accuracy with which the output fibers can be addressed. The n th output fiber, whose core is located at $s(n)$ from the optical axis of the $4f$ system, is addressed by the first diffraction order of a spatial grating G_n written onto the SLM. The theoretical spatial period of G_n is given by

$$P(n) = \frac{\lambda f}{s(n)} = v(n)\delta x, \quad (1)$$

where $v(n)$ is the number of pixels to be used per period of G_n .

Next, as the FLC SLM performs a binary phase modulation, hence generating a Fourier diffraction pattern with Hermitian symmetry, only one half of the output plane is considered to avoid cross talk in symmetric channels. This means that $s(n) > 0$, with $n \geq 1$. From Eq. (1) we get the arithmetic equation

$$v(n) = \frac{s(1)v(1)}{s(n)}. \quad (2)$$

The period profile of G_n must be chosen to maximize the diffraction efficiency in the first diffractive order. For binary gratings a suitable candidate is the square $(0, \pi)$ phase grating with a 0.5 duty cycle, leading to a 41% maximum theoretical diffraction efficiency $(4/\pi^2)$. Finally, optimizing the switch capacity consists of determining the successive period codes

Table 1. Example of an Optimized Fiber-Array Configuration and the Corresponding Cross-Talk Values as Defined by Eq. (4)^a

Fiber Number	$v(n)$	$s(n)$ (μm)	$\Delta s(n)$ (μm)	Cross Talk (dB)				
				D_1^n	D_2^n	D_3^n	D_4^n	D_5^n
$n = 1$	14	250	250	\times	0	0	0	A
$n = 2$	8	437.5	187.5	0	\times	0	0	0
$n = 3$	6	583.3	145.8	0	0	\times	0	B
$n = 4$	4	875	251.7	0	0	0	\times	0
$n = 5$	2	1750	875	0	0	0	0	\times

^aThe SLM pitch is 11 μm , and the focal length of the lenses used is 25 mm. A value of zero in cell D_i^n ($i \neq 1$) indicates that there is no intensity at the i th channel when the n th fiber is addressed. In only two configurations, denoted by A and B, does the cross talk have a nonzero value: -17.9 and -20.8 dB, respectively.

$\{v(1), \dots, v(L)\}$ matched to the fiber-position set $\{s(1), \dots, s(L)\}$, such that

- (i) The number of addressable fibers L is maximal for a given SLM capacity.
- (ii) Cross talk is minimal at every fiber for all switching configurations, given that

(a) There are limits on the SLM resolution, which can be estimated to pixels of $\approx 7 \mu\text{m}$ with currently available FLC technology.

(b) A minimum fiber interspacing is imposed at the output plane. Practically, this will be maintained at approximately 140 μm (a fiber-cladding diameter of 125 μm).

The cross talk can be evaluated briefly, as follows. We consider that p th-order cross talk occurs when the n th fiber is addressed, if the p th diffraction order ($p > 1$) of grating G_n is incident upon another channel, say, the $(n + m)$ th fiber. This happens when

$$\frac{s(n + m)}{s(n)} = p = \frac{v(n)}{v(n + m)}. \quad (3)$$

From the expression of the diffraction-order intensities of a binary phase grating, the cross-talk value [at the $(n + m)$ th fiber], normalized with respect to the useful signal (at the n th fiber), is given by

$$D_{n+m}^n = \frac{\sin^2(\pi p \alpha_n)}{p^2 \sin^2(\pi \alpha_n)}, \quad (4)$$

where α_n is the duty cycle of grating G_n . In most cases, when the number of pixels $v(n)$ can be taken as an even number, we have $\alpha_n = 0.5$, which yields $D_p^n = 0$ for every even value of p . Of course, the cross talk is also, and more efficiently, eliminated if the ratio $s(n)/s(n + m)$ is not an integer. Nonequidistant fiber arrays are then advantageous.

The effect of combining these two possibilities is shown in Table 1, in which both the gratings and the fiber-core locations are optimized for the case of $L = 5$ fibers. What is remarkable is that cross talk is eliminated for 18 cases out of 20 and the value for the two remaining cases remains low. The required

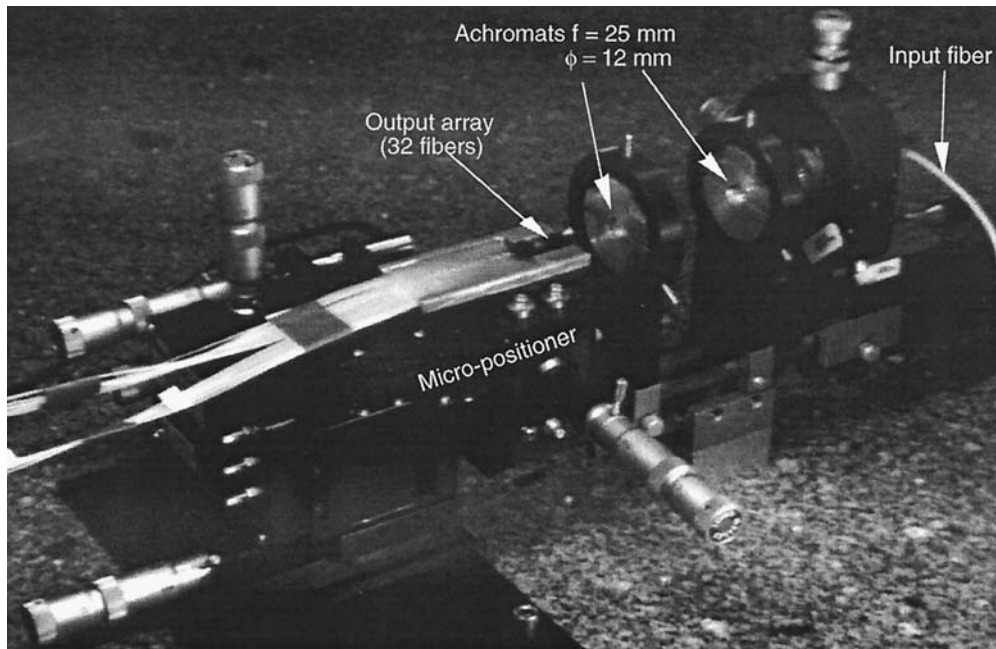


Fig. 3. SM fiber-to-SM fiber interconnection setup.

SLM resolution is then $\delta x = \lambda f / [s(1)v(1)] = 11 \mu\text{m}$, which is consistent with constraint (a) above. Considering a width for the SLM modulation area that minimizes aperturing in the Fourier plane, e.g., at least 7 mm, we obtain 640 pixels in the modulator. A larger capacity could be obtained with a smaller δx and larger focal lengths or a smaller minimal distance between the output-fiber cores. We estimate that as many as 16 fibers could be addressed by using the same one-dimensional (1-D) topology. Nevertheless, it is worth moving up to a 2-D geometry for the SLM and the output fibers, which we can do simply by crossing of the parameters of Table 1. The switch capacity would then be increased to 25 fibers. However, to maximize the diffraction efficiency of the binary 2-D gratings G_{mn} , one should design the SLM and the output fibers by using more sophisticated computer-generated holography algorithms⁹ to obtain nonseparable distributions. Moreover, the difficulty will lie in designing and fabricating 2-D fiber arrays with the alignment tolerances mentioned above, as these components are not, to our knowledge, commercially available at industrially acceptable costs.

4. Experimental Results

The overall fiber-to-fiber coupling efficiency depends on the (i) fiber- and lens-positioning accuracies, (ii) lens aberrations, (iii) quality of the fiber-end cleaves, and (iv) SLM loss. Fiber-end misalignments, namely, transversal, angular, and longitudinal, can be drastically eliminated by use of multiaxis and high-resolution alignment devices. To this aim the output-fiber array in our experiment was held on a micropositioner with six degrees of freedom and piezoelectric actuators.

Figure 3 shows an overall view of the setup used for the experiment. With respect to factor (ii), the achromats used were designed to exhibit minimal spherical and coma aberrations. In addition, these optics are used below $f/3$ in all configurations, so their performance can be considered to be diffraction limited. The fiber-to-fiber coupling efficiency was experimentally measured at 62%, i.e., a coupling loss of 2 dB, which implies that parameters (i), (ii), and (iii) are optimized. The last point, (iv), depends on the SLM design and is considered separately. In fact, the SLM loss can be divided into absorption (i.e., a fill factor less than 100% and aperturing outside the device modulation area), Fresnel reflection, diffraction efficiency, and mismatch in pixel size. Absorption, reflection, and diffraction efficiencies are evaluated in Subsection 4.B. We now focus on the problem of SLM resolution.

A. *In Situ* Spatial Light Modulator Resolution Determination

If we consider that no aperturing occurs in the SLM plane, the field incident upon the n th output-fiber core located at $s(n)$ can be represented by the same Gaussian field distribution as the field emerging from the input fiber. However, because of uncertainties inherent in the SLM and the fiber-array fabrication processes, we must consider deviations of both the SLM pixel size and the output-fiber location with respect to the theoretical values δx and $s(n)$. These deviations are imposed by both the operating wavelength ($1550 \pm \delta\lambda$) and the focal length f of the lenses at this wavelength. Therefore there is a difference σ_n between the actual position of the n th fiber, $s'(n) = s(n) + \delta s$, and the position of the first diffractive order

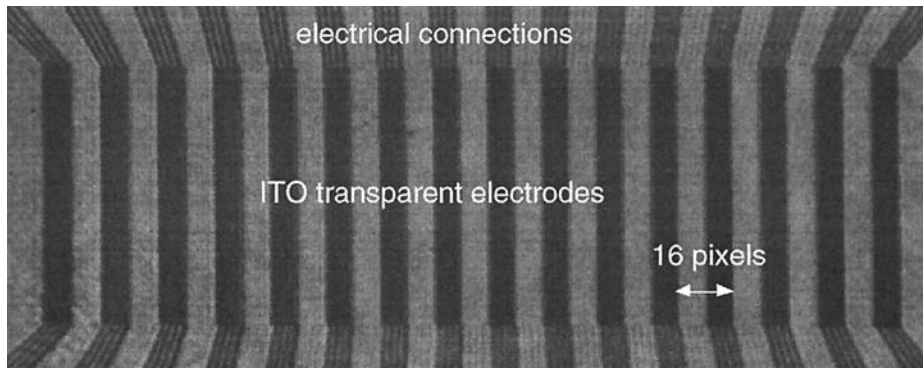


Fig. 4. Experimental view of the FLC SLM displaying a grating with 16 pixels/period. The pixel dimensions are $22\ \mu\text{m} \times 6\ \text{mm}$ (width \times height).

of G_n , which is used to address the fiber. This offset can be expressed as

$$\sigma_n = \delta s + s(n) \left(1 - \frac{\delta x}{\delta'x} \right), \quad (5)$$

where $\delta'x$ is the actual resolution of the SLM. The resulting power-transmission coefficient is given by¹⁰

$$T_n = \exp \left(-2 \frac{\sigma_n^2}{w_0^2} \right), \quad (6)$$

where w_0 is the width parameter of the output mode. Quantitatively this means that the SLM pixel size must be determined to at least a $\pm 0.2\text{-}\mu\text{m}$ accuracy.

We take this severe constraint—as well as the uncertainties concerning the focal length of the lenses—into account by using the following *in situ* procedure. A set of fixed binary-phase gratings with a period size that varies slowly around a theoretical central value is used to simulate several SLM's with variable resolutions. For an equidistant fiber array with a $250\text{-}\mu\text{m}$ pitch this central period size is $155\ \mu\text{m}$ and corresponds to $P(1)$ defined in Eq. (1). The diffractive elements used are 1-D Dammann gratings that provide 1-to- L connections with uniform weights. Nine Dammann gratings etched on the same glass plate were successively tested, and the connection efficiency was measured for $L = 5$ channels in parallel. Here the cost function to maximize is the ratio of the optical power coupled and detected at the exit ends of the five central fibers, measured by a multichannel photodetector designed for this purpose.

The expected normalized value can be decomposed into $\eta = \eta_d \eta_l \eta_t \eta_m$, where

- η_d features the theoretical diffraction efficiency of the Dammann grating, measured at 0.75.
- η_l is the fiber-to-fiber launching efficiency, measured at 0.62% with no diffractive element in the Fourier plane.
- η_t includes the transmission factor of the diffractive plate (limited by Fresnel reflection) and the absorption outside the grating area ($\eta_t = 0.75$).
- η_m is the coupling loss resulting from the mode mismatch induced by the intermediate spatial aper-

turing ($\eta_m = 0.9$, if the grating pupil is a $7\ \text{mm} \times 7\ \text{mm}$ square).

Therefore an overall power-coupling ratio of $\eta = 0.3$ is expected in the five central fibers. Experimentally the largest measured value is $\eta = 0.25$ for a grating period of $155.3\ \mu\text{m}$. This rather encouraging result could certainly be improved by a decrease in the increment between two successive grating periods, which was limited to $0.4\ \mu\text{m}$ by the mask-design process. In the following, this experimentally determined grating period $P(1)$ serves to determine the SLM resolution with the relation $\delta x = P(1)/v(1)$.

B. Characterization of the Large-Tilt-Angle Ferroelectric Liquid-Crystal Spatial Light Modulator

1. Cell Design

In addition to the considerations presented above, the switch performance also depends on the quality of the phase modulation induced by the FLC and achieved by birefringent-axes rotation. With a large-tilt-angle ($\approx \pi/4$) smectic C* FLC device, a lossless and polarization-insensitive binary-phase modulation can be obtained, provided the cell is a half-wave plate at the operating wavelength. This behavior strongly depends on the FLC thickness e , the wavelength λ , and the LC birefringence $\Delta n(\lambda)$. An investigation of the performance of 45° tilt angle FLC SLM's at a wavelength of $1550\ \text{nm}$ was carried out with a test device fabricated¹¹ in our laboratory.¹² Optical quality glass plates ($\lambda/6$ roughness) were used for the FLC cell. Figure 4 shows an enlarged portion of this 1×256 pixel SLM on which a binary diffraction grating is displayed. The pixel size was limited to $22\ \mu\text{m}$ [or 1150 dots/in. (dpi)] by the masking process, with an interpixel spacing of $3\ \mu\text{m}$ corresponding to an 88% fill factor.

The birefringence of the LC used was given by the manufacturer (CHISSO, Model CS 2005) at $546\ \text{nm}$, namely, $\Delta n = 0.18$. The birefringence at $1550\ \text{nm}$ was determined by use of a Fabry-Pérot interferometer in which we placed a sample cell with two distinct zones of the same thickness: one filled with LC and the other filled with air (isotropic, $n = 1$). We

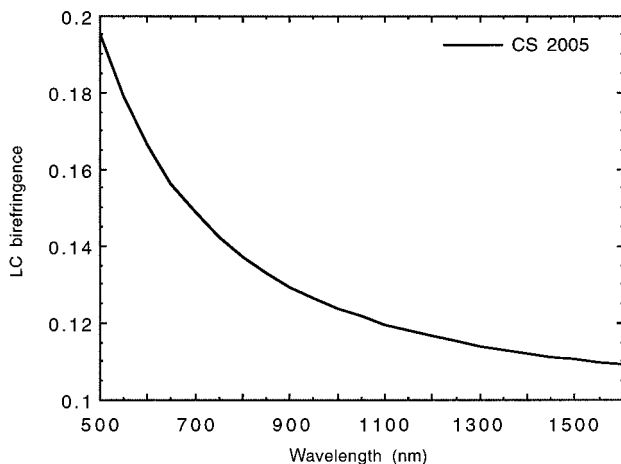


Fig. 5. Extrapolated birefringence of the Model CS 2005 LC as a function of the wavelength.

measured a birefringence of $\Delta n \approx 0.11$, yielding an optimal cell thickness of $e = 1.55/(2 \times 0.11) = 7 \mu\text{m}$. The critical point in the large-tilt cell fabrication is the LC alignment, which was realized by the application of a specific, propriety sequence of ac-dc control voltage to the cell.

Polarimetric measurements made with available sources at 1550, 1300, and 850 nm showed that the cell was very close to a half-wave plate at 850 nm instead of 1550 nm. To explain this, we extrapolated the birefringence of the LC in the 540–1600-nm range by a Cauchy law of the form

$$\Delta n(\lambda) = A + \frac{B}{\lambda^2}, \quad (7)$$

where the curve parameters are determined by the two known data points at 546 and 1550 nm ($A = 23,824$ and $B = 0.1$). The curve is represented in Fig. 5 and shows a value of $\Delta n = 0.13$ at 850 nm, from which we can estimate the actual cell thickness to 9 μm (20% larger than expected). This mismatch in the operating wavelength does not alter the assessment for polarization insensitivity, which remains applicable here.

2. Diffraction-Efficiency Measurements

Hence the diffractive characteristics of the SLM are tested at 850 nm, first by measurement of the first-order diffraction efficiencies for successive grating periods displayed on the device and then by rotation of

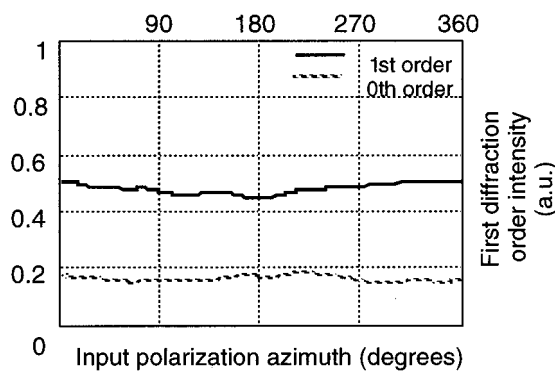
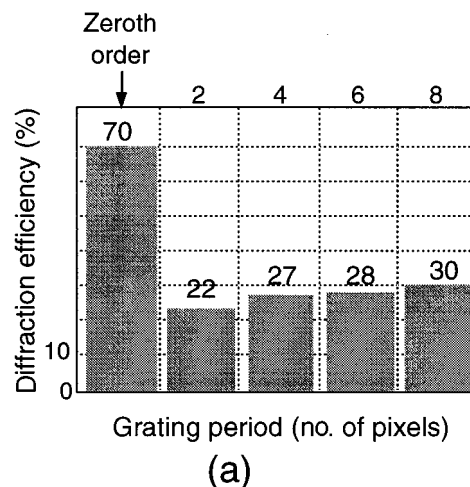


Fig. 7. SLM diffraction efficiency: (a) With varying grating periods and for a given grating period. (b) As a function of the azimuth of the input linear polarization.

the (linear) input polarization. Figure 6 shows an image of the output plane captured by a CCD camera at the back focal plane of a positive lens, showing the two symmetric ± 1 orders. For a given polarization state (e.g., linearly polarized at 45° to the cell-rubbing direction), an average diffraction efficiency of 27% is observed [Fig. 7(a)]. This efficiency (measured with a photodiode) is defined as the ratio between the incident beam intensity (before the SLM) and the first-diffraction-order intensity used for the connection. This experimental value, which includes the overall loss through the system, is encouraging compared with the theoretical limit value (41% for a binary

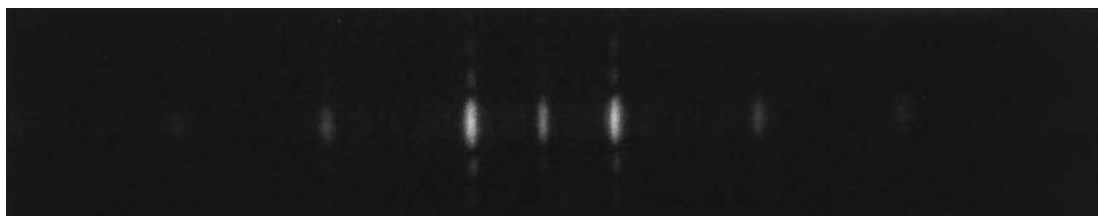


Fig. 6. Intensity distribution of the Fraunhofer diffraction pattern produced by a binary phase grating displayed on the FLC SLM (Fig. 4).

phase grating) if we consider the slight deviation measured from a half-wave plate, the absorption in the device (80% at 850 nm), and the ghost diffraction grating resulting from the indium tin oxide (ITO) interpixel [$\approx 2\%$ losses, although the ITO thickness was reduced from the usual 1500 Å to 200 Å (15,000 nm to 2000 nm)]. In addition, the device performance turns out to be weakly dependent on the input polarization state. As can be seen from Fig. 7(b), the relative variation of the diffraction efficiency with the input polarization is no greater than 10%. The same result was obtained with an elliptical input polarization. The polarization insensitivity can be significantly improved, provided the product $e\Delta n$ is controlled with high accuracy to ensure an exact half-wave plate operation. We plan for this to be the case for a future version of the FLC cell.

3. Wavelength Dependence

If $\lambda_0, \dots, \lambda_{M-1}$ is the wavelength comb carried by each fiber input to the optical cross-connect, M spatial switches are employed, with each of them routing channels at a single wavelength. In our case the design of an individual switch at λ_k can be optimized by adjustment of the SLM resolution δx_k . Thus the SLM performance does not need to be wavelength insensitive. We shall, however, evaluate this parameter by considering the following simple case. First, the LC birefringence can be considered as constant over the wavelength comb, which ranges approximately from 1530 to 1570 nm. Therefore the SLM wavelength sensitivity is due to only dispersion by diffraction. We assume that the SLM pitch δx_k is optimized for the wavelength λ_k [see Eq. (1)]. If the device is now used at a wavelength λ ($\lambda \neq \lambda_k$), the lateral shift induced at the output addressed position is given by

$$\delta s_k = \frac{f}{P(\delta x_k)} \delta \lambda, \quad (8)$$

where $P(\delta x_k)$ is the spatial period of the diffraction grating displayed on the SLM and $\delta \lambda = \lambda - \lambda_k$ is the deviation in the operating wavelength. From the fiber-to-fiber coupling efficiency given by Eqs. (6) and (8), we deduce the tolerance wavelength deviation $\delta \lambda$ that generates a coupling loss of μ dB:

$$\delta \lambda = \pm \frac{1}{f} \left(\frac{\ln 10}{20} \right) P(\delta x_k) w_0 \sqrt{\mu}. \quad (9)$$

Hence the effective SLM wavelength bandwidth, which can be estimated by $2\delta \lambda$, is represented in Fig. 8 with $P(\delta x_k) = 155 \mu\text{m}$, $w_0 = 5 \mu\text{m}$, and $f = 25 \text{ mm}$. If we then consider that a maximal coupling-loss variation of 0.1 dB can be tolerated between the output channels ($\approx 6.5\text{-nm}$ bandwidth), as many as eight consecutive wavelength-division multiplexing channels spaced by 0.8 nm can be switched by the same component.

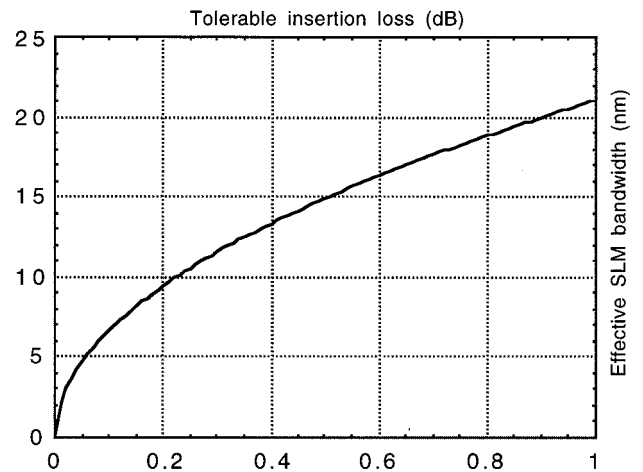


Fig. 8. SLM bandwidth as a function of the tolerable insertion-loss dispersion.

5. Switch Performance

Combining the results presented in Subsection 4.A for the SLM pitch with the conclusions described in Subsection 4.B concerning the FLC cell, we are currently developing a new version of the large-tilt FLC SLM. A nonuniform output-fiber array is also being designed in parallel, with the purpose of integrating a 1-to-8 free-space switch. On the basis of 1-to-5 measurements, an average insertion loss of 7.7 dB is expected, i.e., 5.2 dB of SLM loss and 2.5 dB from the connection loss in free space. Provided that the LC cell thickness is appropriate, the polarization dependence of these insertion losses should not exceed 0.2 dB. Compared with optomechanical switches, the connection repeatability and life span are expected to be excellent, as switching is performed with no moving parts. The device switching speed, measured on the current version of the SLM, is approximately 400 μs .

6. Discussion and Prospects

We have both discussed and experimentally tested the geometrical and phase-modulation features of a (large-tilt-angle) FLC SLM for the purpose of building a space-switching block between SM fibers at a reconfiguration speed that is compatible with the management requirements of wavelength-division multiplexing networks. As expected, the insensitivity of the device performance to the input polarization state has been confirmed experimentally. In addition, a joint optimization of the geometries of the SLM and the output-fiber array has allowed us to design switches with increased capacity and to eliminate or drastically reduce the cross talk between output channels.

Future requirements are that the FLC birefringence and the cell thickness must be determined and controlled with higher accuracy to provide both a lower insertion loss and a higher polarization insensitivity. Using the same 1-D SLM geometry and increasing the device resolution to the limits of the

present FLC technology (5 μm seems to be a consensual figure) allows the maximal addressing capacity to be limited by lens aberrations occurring with high deflection angles. Nevertheless, addressing 10 SM fibers should be possible with the present configuration.

As was pointed out in Ref. 7, the capacity of such a free-space switch could be significantly increased if we moved up to a 2-D geometry, both for the SLM and for the output-fiber array. The issue is then transferred into the technological domain. SLM's in the form of FLC-over-silicon VLSI backplanes are becoming commercially available, and their cost is likely to decrease with the expansion of the miniature display market.¹³ Although the optical (flatness) quality of these reflective modulators is a critical point, they offer, compared with the standard modulator scheme presented here, a higher switching rate (up to a few microseconds), a higher pixel density, and an improved electronics-to-optics interface.

The 2-D switch insertion loss will also greatly depend, both in value and in uniformity, on the accuracy of the core locations within the output-fiber matrices. These have remained up to now experimental components that are designed individually in the laboratory, so their cost is difficult to evaluate. Nevertheless, as an estimate for the attainable capacity for the 2-D switch version, it seems possible that 8×8 SM fiber arrays can be designed (with the same performance as those described in Section 5) in connection with the available 2-D FLC SLM's features, e.g., at least 1000 pixels with a 6–7- μm pitch per dimension.

This research was funded by France Telecom/Centre National d'Etudes des Télécommunications (CNET). Special thanks are extended to Philippe Gravey and Léon Bonnel [CNET de Lannion, Département Processeurs et Commutation Optique (PCO)] and to Laurent Dupont and Esther Gros from our Department of Optics.

References and Note

1. A. Jourdan, F. Masetti, M. Garnot, G. Soulage, and M. Sotom, "Design and implementation of a fully reconfigurable all-optical cross-connect for high-capacity multiwavelength transport network," *J. Lightwave Technol.* **14**, 1198–1206 (1996).
2. B. Robertson, E. J. Restall, M. R. Taghizadeh, and A. C. Walker, "Space-variant interconnection networks in dichromated gelatin," in *Optics in Complex Systems*, F. Lanzl, H. Preuss, and G. Weigelt, eds., Proc. SPIE **1319**, 128–129 (1990).
3. R. C. Battig, C. C. Guest, S. R. Schaefer, and D. J. Toms, "Simulated annealing of binary holograms for the interconnection of single-mode structures," *Appl. Opt.* **31**, 1059–1066 (1992).
4. D. C. O'Brien, R. J. Mears, T. D. Wilkinson, and W. A. Crossland, "Dynamic holographic interconnects that use FLC SLM's," *Appl. Opt.* **33**, 2795–2803 (1994).
5. H. Yamazaki and S. Fukushima, "Holographic switch with a ferroelectric liquid-crystal spatial light modulator for a large-scale switch," *Appl. Opt.* **34**, 8137–8143 (1995).
6. U. Killat, G. Rabe, and W. Rave, "Binary phase gratings for star couplers with high splitting ratio," *Fibre Integr. Opt.* **4**, 159–167 (1982).
7. S. T. Warr and R. J. Mears, "Polarisation insensitive diffractive FLC systems," *Ferroelectrics* **181**, 53–59 (1995).
8. P. Berthelé, H. Hamam, and J.-L. de Bougrenet de la Tocnaye, "Programmable CGHs using ferroelectric liquid crystal material as phase modulators," *Ferroelectrics* **181**, 69–78 (1995).
9. J. P. Allebach, M. A. Seldowitz, and D. W. Sweeney, "Synthesis of digital holograms by direct binary search," *Appl. Opt.* **26**, 2788–2798 (1987).
10. D. Marcuse, "Loss analysis of single-mode fiber splices," *Bell Sys. Tech. J.* **56**, 703–718 (1977).
11. The ITO layer etching was performed at the France Telecom Research Laboratories, Centre National d'Etudes en Télécommunications de Lannion, Département Passif Intégration Hybride.
12. P. Berthelé, B. Fracasso, and J.-L. de Bougrenet de la Tocnaye, "Efficient beam steering in the 1.55 micron window using a large tilt FLC one-dimensional array," *Ferroelectrics* (to be published).
13. M. D. Wand, R. T. Vohra, W. N. Thurnes, and K. M. More, "High resolution, color FLC miniature display and FLC materials optimized for their operation," *Ferroelectrics* (to be published).

Design and Performance of a Versatile Holographic Liquid-Crystal Wavelength-Selective Optical Switch

B. Fracasso, J. L. de Bougrenet de la Tocnaye, M. Razzak, and C. Uche

Abstract—We present here a theoretical analysis and the experimental evaluation of a wavelength-selective optical space switch based on three-dimensional beam steering using the diffractive liquid-crystal (LC) technology. Here, many advantages are combined within the same device. First, the motionless operation of diffractive LC devices provides stable, accurate, and reproducible switching maps, as well as a very simple addressing and supervision scheme. Then, it is shown both qualitatively and quantitatively that diffractive (or holographic) structures enable the extension of the device functionalities to multicast switching and variable-wavelength-band selection. This represents a first step toward compact optical routing nodes and merging wavelength- and space-routing capabilities.

Index Terms—Beam steering, holographic gratings, liquid-crystal (LC) devices, optical switches, spatial light modulators.

I. INTRODUCTION

IN THE forthcoming generation of dense-wavelength-division-multiplexed (DWDM)-based optical meshed networks, where all-optical nodes will have to manage large sets of very high-bit-rate optical channels in a transparent manner, a key issue will be the availability of flexible photonic switching modules to meet various system requirements. Different operations will have to be implemented within the same device, such as space routing, wavelength-band or individual wavelength extraction, attenuation, or switching. In addition, such wavelength- and space-routing functions will benefit by being fused in a single operation to minimize the device size and costs. Free-space, or three-dimensional (3-D), optic architectures using programmable holographic elements appear then as an efficient solution to meet this need. Although several technical hurdles still must be overcome, an attempt to fit new technologies with multiple system requirements will open a promising field of investigations for designing new functions and architectures.

To illustrate this approach, we consider the current issue of 3-D optical switching architectures, which are known to be suited solutions to overcome the capacity bottleneck inherent in planar architectures, planar lightwave circuits (PLCs), owing to their ability to handle numerous optical links between two-dimensional (2-D) fiber arrays. The resulting high-port-count

optical switches considered are potentially scalable to more than 1000 channels, with strictly nonblocking capabilities. Whatever beam deflection technology used, such devices can be separated in two types: the single-stage steering element ($1 \times N$ switch) [1], which also serves to build optical channel protection nodes, and the two-stage ($2N$) steering module set providing the $N \times N$ switching functionality [2].

Throughout this paper, we will detail and extend the $1 \times N$ switching function to demonstrate the flexibility of holographic steering approaches, including switching and dynamic wavelength filtering applications. The key device considered here is a beam-steering element based on a liquid-crystal digital hologram (LCDH) technology.

In Section II, we shall emphasize the inherent accuracy and repeatability of holographic connections. Section III will summarize the assessment results obtained with a LCDH switch used in a basic version. Extended capabilities of the device, using its wavelength-specific capabilities will be presented in Section IV.

II. LCDH AS A SUITABLE 3-D TECHNOLOGY

A. General Considerations

A large-capacity beam-steering device first assumes a flexible and large-throughput interface with upper system levels. In practice, it requires a design compatible with very-large-system-integration (VLSI) circuit technology to avoid data transfer bottlenecks between the memory of the monitoring software and the microdeflector array. Only two generic 3-D optical technologies are VLSI compatible so far: microelectromechanical systems (MEMS) [3] and miniature silicon back-plane LC spatial light modulators (SLMs) [4], often referred to as LCOS (liquid crystal on silicon) SLMs. Both are well suited to the design and fabrication of large-capacity 3-D optical space switches, requiring 2-D high-resolution beam-steering matrices. However, they are based on two different principles to route the light paths: beam steering by a micromirror (MM) and beam diffraction by a pixellated LC SLM, which is one of the most flexible and efficient techniques to implement programmable digital holograms (DHs).

Both techniques have their own advantages: MM arrays have low loss and are intrinsically polarization and wavelength insensitive. In contrast, LCDHs operate with no moving part and can be configured for a wide range of switching topologies. This property is due to the large available spatial bandwidth (in two dimensions) of digital holograms, which can be used not only

Manuscript received August 7, 2002; revised April 22, 2003. This work was supported in part by the French Ministry of Industry under the CRISTO Project. The authors are with Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications de Bretagne, Optics Department, 29285 Brest Cedex, France (e-mail: bruno.fracasso@enst-bretagne.fr; chidiuche@hotmail.com).

Digital Object Identifier 10.1109/JLT.2003.815512

to steer or route the optical signals, but also to provide additional functions, such as an adaptive correction of individual channel insertion loss (also possible with MEMS, see, e.g., [5]), wavelength drift compensation, and input/output (I/O) channels monitoring. The last point becomes a decisive advantage over MEMS technology in terms of system flexibility.

Finally and compared with the MM, the LCDH technology enables addressing of several output channels simultaneously in an almost arbitrary switching map (see Section IV-A), providing natural multicast capabilities. It is also possible to control the central wavelength and bandwidth of the selected output channel (Section IV-B), providing a bank of dynamic wavelength filters. All these operations on optical channels, either of the spatial or wavelength selection type, will be achieved using the same basic device. These points will be detailed after a discussion of the steering nature of the two above-mentioned techniques.

B. Optical Beam Steering: Analog Versus Digital

Two important criteria to evaluate the performance of microdeflectors are the steering resolution and repeatability. These two parameters are strongly dependent on the nature of steering, which can be considered as analog with MMs and digital with DHs. This point has a direct influence on the complexity of the supervision layer of the steering device, which must compensate for possible thermal deviations of either the driving circuitry characteristics or mechanical stress forces within the inner structure of the microdeflector.

1) *MM Devices:* Two cases will be considered: 2-D and 3-D MEMS. 3-D devices operate by tilting back and forth MMs in two dimensions, as depicted in Fig. 1(a). The two tilt angles (θ_x , θ_y) are controlled either by electrostatic or electromagnetic drive mechanisms. Establishing 3-D connections within a $N \times N$ optical switch based on 3-D MM's usually consists of two steps: 1) precomputed connections (i.e., $2N$ matched angle pairs) are established by reading memory stored current values, and then 2) a dynamic feedback procedure is used to minimize the fiber-to-fiber insertion loss. Depending on the system capacity, i.e., the number of initial steering angles to correct, the second step may last several hundreds of milliseconds.

An alternative MEMS design moves microdeflectors in two dimensions (2-D MEMS) between two preestablished positions [Fig. 1(b)], allowing light to pass through unchanged or to be redirected. Using this principle, crossbar switches and programmable add-drop multiplexers (ADMs) can be implemented straightforwardly. Although such latching structures are locally more complex than tilting mirrors, they exhibit an inherent better accuracy than 3-D MEMS.

2) *LCDH Approach:* A digital hologram is displayed on the SLM (LCOS) in the form of a reflective phase function $H(x, y)$, which is quantized both in value and spatially, depending on the LC technology used.

An N -level quantization scheme imposes $H = \{\exp(i\phi_1), \dots, \exp(i\phi_N)\}$ with $\phi_k = 2k\pi/N$. Depending on the type of LC used, two cases can be considered: $N = 2$ with smectic LC SLMs and $N = 2^k$ ($k > 1$) for nematic LC devices. In first approximation, the steering function H is a grating distribution, e.g., spatially periodic in x and y , with

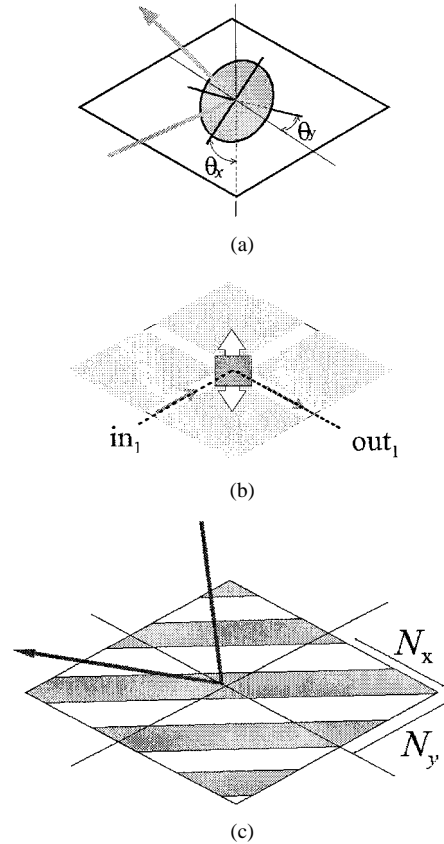


Fig. 1. Different beam-steering structures: (a) 3-D MEMS; (b) 2-D MEMS; and (c) LCDH.

periods P_i ($i = x, y$). The steering angles are then determined by the so-called grating equation

$$P_i(\sin \alpha_i + \sin \theta_i) = k\lambda \quad (1)$$

with α_i , θ_i , and k respectively denoting the angles of the incident and diffracted beams and the considered diffraction order. The steering efficiency η is given by the optical power diffracted in the first diffraction order [6]

$$\eta(N) = \left(\frac{\sin\left(\frac{\pi}{N}\right)}{\frac{\pi}{N}} \right)^2 \quad (2)$$

yielding $\eta(2) = 0.41$ and $\eta(8) = 0.95$.

The second quantization of the steering function H is the spatial sampling, which can be expressed by $P_i = pN_i$, where p denotes the pixel size per dimension order and N_i the number of pixels per period (PPP) used in the i th dimension [see Fig. 1(c)]. Thus, unlike MM devices, the steering angle accuracy is no longer limited by the driving voltage noise value, as it only depends on the fixed spatial resolution of the SLM (i.e., pixel size). Assuming a normal incident beam and a paraxial description of diffraction (valid here as large grating periods with respect to λ are considered), the diffracted angles θ_i are given by

$$\theta_i = \frac{\lambda}{pN_i}. \quad (3)$$

Typical values used in wavelength-division-multiplexed (WDM) fiber optical switches are $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$,

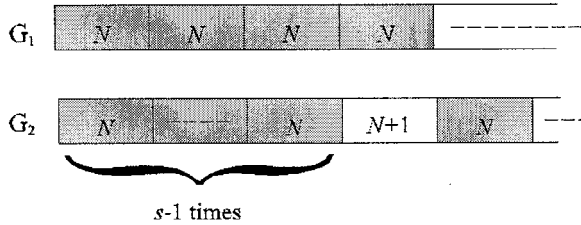


Fig. 2. Similar periodic grating structures, which only differ by the $N_i + 1$ pixel sequence.

$p = 12 \mu\text{m}$, and N_i ranging from 4 to 100 pixels, yielding $0.07^\circ < \theta_i < 1.85^\circ$. The first consequence is an optimal steering repeatability (for a given λ), since the diffraction angle only depends on the N_i parameter, imposed by the fixed pixellated structure of the SLM.

Then, from (2), the resolution at which the deflection angle can be adjusted is given by

$$\delta\theta_i = \left| \frac{\partial\theta_i}{\partial N_i} \right| \delta N_i = \frac{\theta_i}{N_i} \delta N_i \quad (4)$$

where δN_i denotes a small change in N_i . Even if $\delta N_i = 1$ is the smallest physical variation (corresponding to one pixel) between two gratings, subpixel variations can be obtained using periodic perturbations of the grating pattern. A simple illustration is given here by considering the two almost similar grating patterns G_1 and G_2 of Fig. 2, in which one-dimensional (1-D) notations are used for clarity.

The number of PPP for G_1 is N_i (yielding a diffraction angle $\theta_i = \lambda/N_i p$), and G_2 is generated by a periodic sequence of $sN_i + 1$ pixels, with $s - 1$ subperiods containing N_i pixels followed by one period containing $N_i + 1$ pixels. Hence, the average number of pixels per period for G_2 is $N_i + 1/s$, and the difference in angular shift between the two gratings is

$$\theta(G_1) - \theta(G_2) = \frac{\theta_i}{sN_i + 1}. \quad (5)$$

The gain in steering accuracy, compared with value $\delta\theta_i$ given by (4) with $\delta N_i = 1$, can be evaluated by the ratio

$$R = \frac{\delta\theta_i}{\theta(G_1) - \theta(G_2)} = s + \frac{1}{N_i} \approx s. \quad (6)$$

The smallest value for the oversampling factor s is $s_{\min} = 2$, and it is upper-bounded by the number N_{pix} of pixels of the SLM (per dimension) to $s_{\max} = N_{\text{pix}}/2N_i$. With typical values of $N_{\text{pix}} = 1000$ and $N_i = 10$, the steering resolution gain factor is $R = 50$.

Hence, owing to the optimal repeatability of the deflection angles induced by LCDH devices, the resulting fiber-to-fiber connection procedure generally consists of a single step, i.e., the loading of the appropriate diffraction grating. Steering angle adjustment can, however, be considered in two cases: 1) the need for wavelength-specific filtering operations, such as optical bandwidth readjustment and 2) dynamic beam positioning for unlikely small mechanical stress in the packaging structure (thermally induced).

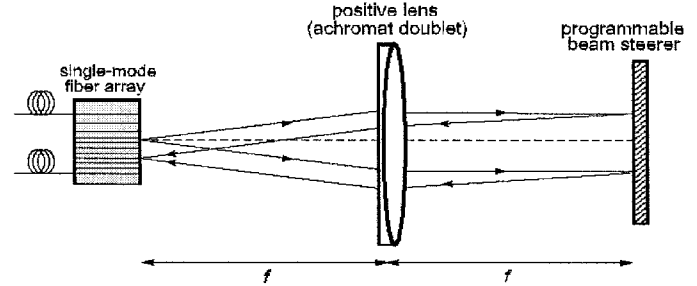


Fig. 3. $1 \times N$ optical switch principle.

III. LCDH $1 \times N$ OPTICAL SWITCHING MODULE

A first attempt to show the promising tradeoff between performance and versatility of LCDH devices was demonstrated using a small capacity (14-channel) 1-D steering module [7]. The device principle is depicted in Fig. 3. The input fiber mode is imaged onto the targeted output fiber core using a basic telecentric optical setup. The intermediate beam deflection is performed by an LC SLM displaying reflective phase gratings, which permits the limiting of the switch length to $2f$ improves the alignment procedure, since the input and output fibers are located in the same fiber holder. As mentioned in Section II-B-2), various phase modulations can be achieved depending on the LC choice. An almost continuous phase profile can be obtained with a nematic SLM, but the 2π phase modulation depth is polarization dependent. In contrast, the Smectic C* (SmC*) LC SLM used here in a particular cell configuration [2], [4] makes the device purely polarization insensitive, with a switching time of a few hundreds of microseconds.

An achromat doublet is used here to minimize lens aberrations, which could be further compensated by a proper phase function superimposed onto the SLM steering grating functions. This would result in optimized and uniform fiber-to-fiber power coupling efficiencies. An extensive study of the aberrations induced in a optical fiber switch using a similar architecture can be found in [8].

A custom design was used here for the single-mode fiber (SMF) array. The output fiber core locations were determined according to two criteria: an optimum use of the SLM bandwidth (512 pixels with $15 \mu\text{m}$ pixel pitch) and the minimization of crosstalk levels, resulting from unwanted diffraction orders coupled to nonaddressed fibers. Briefly speaking, if $s(k)$ and $s(l)$ respectively denote the positions of the k th and l th fiber cores, crosstalk would occur if there exists an integer m such as $s(l) = ms(k)$, and relation (2) yields the corresponding relationship between the number of pixels in the corresponding grating periods, $N(k) = mN(l)$. This results in a nonregular intercore spacing in the I/O fiber array, with an average value of $50 \mu\text{m}$.

The overall fiber-to-fiber coupling efficiency mainly depends on the fiber array positioning accuracy and the SLM losses: fiber-to-fiber coupling induces 2-dB losses, whereas the SLM loss is about 6 dB and can be improved to 4.5 dB if antireflection coatings are used on the glass-air interfaces (lens and SLM). This value is due to the symmetric nature of the diffraction patterns stemming from the SLM binary phase gratings: diffraction order $+1$ is coupled into the output fiber, and the same energy

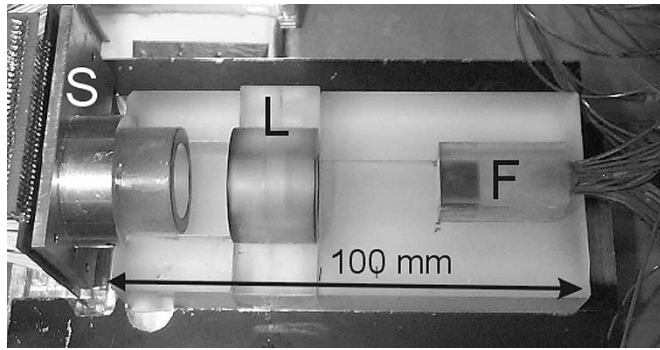


Fig. 4. LCDH optical space switch, with LC SLM module (S), mounted positive lens (L) with $f = 40$ mm focal length, and SMF array (F).

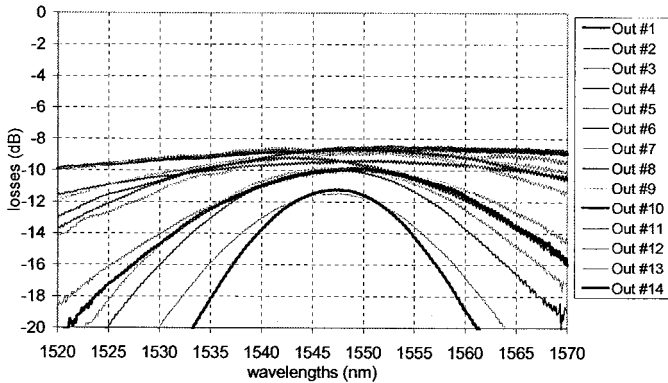


Fig. 5. IL of LCDH optical space switch for the different output ports.

ratio ($\eta(2) = 0.41$ from relation (2)) is generated at the -1 diffraction order. Although initially unused, this information can be used for optical channel protection purpose, as proposed in Section IV-A.

The switch prototype is shown in Fig. 4, with an approximate volume of $150 \times 80 \times 50$ mm.

The device insertion loss (IL) in the C band is shown in Fig. 5. The variation between the ports is chiefly due to a nonoptimal optomechanical alignment and slight core position deviations ($\pm 1 \mu\text{m}$) within the SMF array, this issue being critical for the extreme ports 13 and 14.

Due to the linear geometry of the SMF array, the diffraction angles increase with the port number. As a result and owing to chromatic dispersion, the optical bandwidth ranges from 10 nm (output port #14) up to more than 50 nm (output port #1). If achromatic—or wide-band—properties are required, this limitation can be circumvented using a 2-D fiber arrangement, for which uniform optical bandwidths greater than 50 nm could be obtained. However, the present limited bandwidth for the outer ports is not really a problem because the center wavelength can be dynamically adjusted by modifying the grating period (by software), as shown in Section IV-B.

The measured polarization-dependent loss (PDL) is less than 0.6 dB and could be improved by a better control of the LC cell thickness. The output isolation (crosstalk) between the addressed and nonaddressed fibers varies between -21 and -45 dB. The worst case of -21 dB could be easily improved: 1) to -30 dB by modifying the 1-D SMF array topology and 2) to less than -40 dB by using a 2-D fiber array geometry.

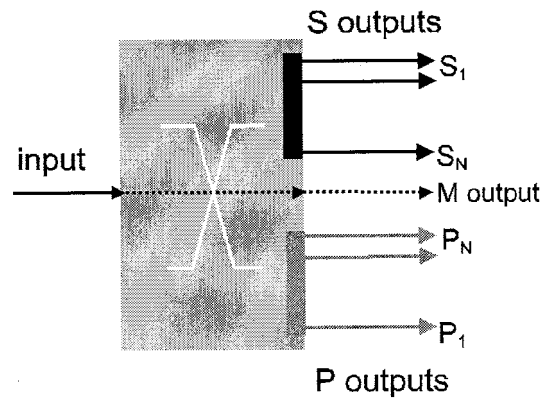


Fig. 6. $1 \times N$ optical switch with monitoring (M-channels) and protection capabilities (P-channels).

Bit-error-rate tests at 10 Gb/s have also been carried out with this switch, using $2^7 - 1$ and $2^{23} - 1$ pseudorandom bit sequences (PRBSs) for all the output ports. All the measurements showed a power penalty lower than 0.2 dB, in the limits of the experimental setup.

The device capacity and crosstalk will be significantly improved moving to a 2-D beam-steering switch, which is currently being implemented using a 640×512 pixel LCOS SLM operating at 1550 nm. The pixel pitch in both dimensions is $15 \mu\text{m}$. A key step was the design of a very-high-density SMF array, fabricated with a bulk grating WDM demultiplexer alignment and packaging module [9]. Using nonregular fiber-to-fiber core spacings of $40 \mu\text{m}$ (average value), more than 100 fibers could be theoretically addressed in a $2 \times 2 \times 10$ -cm volume. For practical reasons, the fiber array prototype is limited to 32 channels.

IV. LCDH MODULE-EXTENDED FUNCTIONALITIES

A. Monitoring and Protection Channels

In addition to routing the signal toward N standard output channels, the LCDH optical space switch naturally provides two types of additional channels so that the overall device capacity can be capitalized using specific SMF arrays. In the previous section, we did not explicitly take advantage of this extended functionality, represented in Fig. 6.

First, a specific output fiber (M) serves as an image of the input channel, as it collects the focused “undiffracted” zeroth order of the grating patterns displayed onto the SLM. Typically, the power at channel M represents -15 dB of the input channel power. As a consequence, it is possible to monitor the optical signal present at the input and, hence, to supervise the switch operation continuously. In addition, the power available at output M can be finely adjusted to any value by slightly varying the duty cycle of the LC grating displayed. This variable optical attenuator (VOA) function can be controlled by software. Its description is outside of the scope of this paper.

Then, each working—or standard “S”—output fiber S_i ($i = 1, \dots, N$) is provided with a symmetric fiber P_i representing its optical image. Again, this is due to the nature of steering by

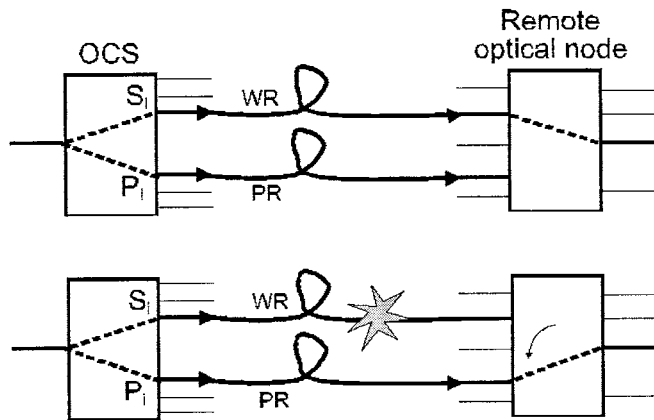


Fig. 7. Automatic protection scheme (or 1 + 1) in an optical network. The emitting node transmits an optical signal through the optical channel switch (OCS) in two different channels: a working route (WR) and a protection route (PR). In case of a line failure detected at the receiving node, a switching fabric selects the alternative route.

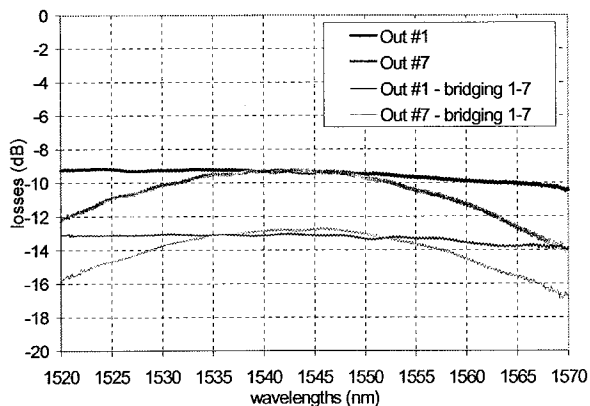


Fig. 8. Optical multicast configuration: test results. Similarly to Fig. 5, the two upper curves show the IL variation for 1-to-1 switching maps. The lower curves give the measured IL in a 1-to-2 configuration.

binary gratings, which, as explained in Section III, automatically provide symmetric diffraction orders. These new channels P_1, \dots, P_N can now be considered as 1 + 1 protection channels outside the switch, as shown in Fig. 7.

As a consequence, the “extended” switch IL value must be corrected (in comparison with the results of Fig. 5) to take the automatic bridging function into account, leading to an average IL value of 5.5 dB, instead of 8.5 dB.

In the previous scheme (Fig. 6), the standard and protected outputs P_i and S_i are necessarily linked by a symmetric arrangement. This constraint can be relaxed by displaying holographic fan-out gratings on the SLM, making the addressing of N arbitrary output channels possible. This capability was experimentally tested on the 1×14 device of Fig. 4, with a balanced diffusion (50%–50%) of the input channel to outputs S_1 and S_7 . The measured results are shown in Fig. 8.

The IL variation between the two cases is close to the ideal value of -3 dB, corresponding to 50% beam power division.

B. Variable-Wavelength Band-Selective Switch

The wavelength-dependent IL curves of Fig. 5 can be capitalized to implement a variable-wavelength-band selective switch

(WSS). Such a device becomes a crucial element in advanced optical networks, as an elementary building block for WDM routing nodes, e.g., optical cross-connects and optical ADMs. WSSs are also proposed in metropolitan optical networks for sharing multiwavelength optical sources between the hub office of a service provider and different content providers [10]. Whereas most proposed WSS implementations consist in cascading distinct demultiplexing and switching planes [11], [12], we suggest here to take advantage of the increasing wavelength dependence of LCDH with decreasing spatial periods. Obviously, the purpose here is to minimize the number of required components, to increase the device efficiency and compactness.

When using programmable LCDHs, the wavelength dependence of the steering efficiency is twofold.

- 1) A possible deviation of the LC phase shift states with respect to the ideal values (0 and π for binary gratings), resulting in both a reduction of the diffraction efficiency (increased zeroth order) and a possible residual PDL. Measurements have shown that it can be neglected over a wavelength range of more than 100 nm.
- 2) The grating dispersion [see (2)] is more significant for large deviation angles, hence, more selective as the aimed fiber is located far from the optical axis.

Fig. 5 shows the chromatic response as a function of the fiber number. We notice for instance that fiber 10 is more wavelength selective than fiber 2, providing wavelength filtering in addition to space switching. The wavelength response is approximately a Gaussian curve, as it is obtained by the overlapping integral of two Gaussian distributions. Hence, the limited slope of the resulting filter is likely to generate interchannel crosstalk at the switch output. This point, however, as well as the “flat-topness” of the transmitted band, can be partially solved by including a proper windowing function into the LCDH steering function, as proposed in [13] for a WDM (de)multiplexer configuration. This issue is currently being investigated in detail.

Digital beam steering also provides a fine spectral tuneability of the available wavelength filter set. On the same principle as described in Section II-B2), it is possible to finely adjust the spot location (in both dimensions and with a submicron accuracy) incoming at the output fiber core and, therefore, to modify the central wavelength of the chromatic response curve of that specific channel. The wavelength shift can be positive or negative. One can evaluate the achievable wavelength shift $d\lambda$ by considering two wavelengths bands, respectively, centered on λ_0 and $\lambda_0 + d\lambda$ that are switched to the same fiber (say channel S_k), with respective grating periods of $N_i p$ and $(N_i + 1/s)p$ (4). The steering angle used to address fiber S_k is then

$$\theta = \frac{\lambda_0}{N_i p} = \frac{(\lambda_0 + d\lambda)}{(N_i + \frac{1}{s}) p}$$

hence

$$\frac{d\lambda}{\lambda_0} = \frac{1}{(N_i s)}. \quad (7)$$

This is illustrated in Fig. 9 where wavelength shifts (decreasing and increasing) are obtained by perturbing the grating distribution addressing fiber 10. The initial wavelength is $\lambda_0 = 1538$ nm, addressed with $N_i = 9$ PPP. Then, using an

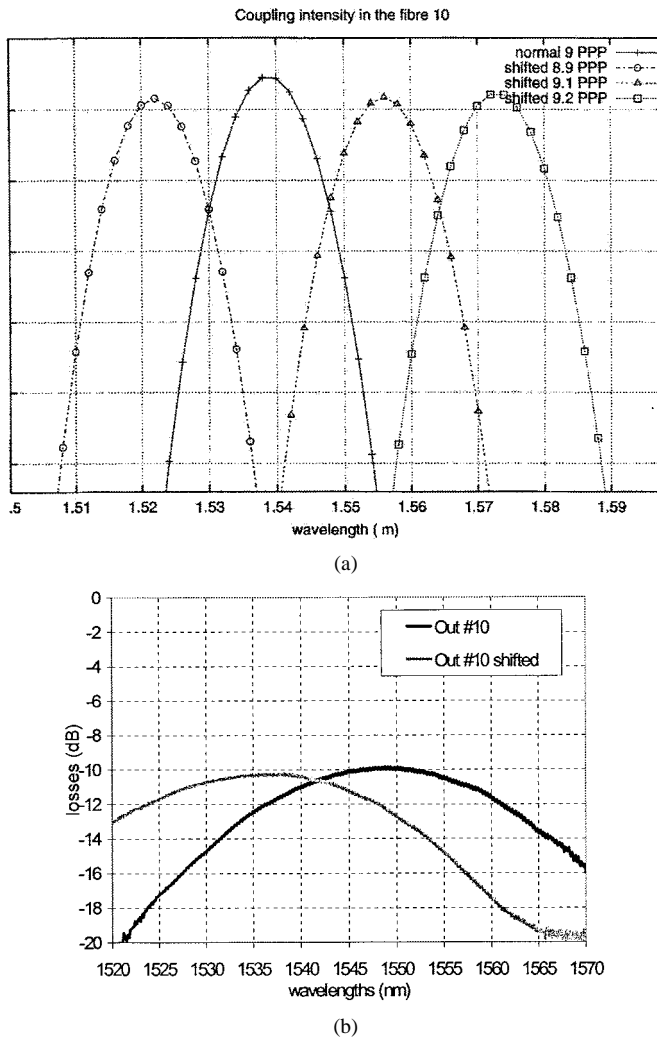


Fig. 9. (a) Simulated wavelength shifts for different grating periods (in PPP) addressing output fiber 10. (b) Measured wavelength shift for output fiber 10, when the number of PPP changes from 9 to 9.1.

oversampling factor $s = 10$ leads to 9.1 PPP, and from (6), to $d\lambda = 1550/(9 \times 10) = 17.2$ nm. This is confirmed both by simulation in Fig. 9(a) and by the experimental measurement of Fig. 9(b), performed on the prototype device of Fig. 4.

The lower and upper bound for $d\lambda$ can be estimated from (6), if we recall from Section II-B-2) that the oversampling factor s varies from $s_{\min} = 2$ to $s_{\max} = N_{\text{pix}}/2N_i$, yielding

$$d\lambda_{\min} = \frac{2\lambda}{N_{\text{pix}}} \quad \text{and} \quad d\lambda_{\max} = \frac{\lambda}{2N_i}. \quad (8)$$

We note from (7) that $d\lambda_{\min}$ values of about 2 nm can be obtained using standard 1280×1024 pixel LC SLMs ($N_{\text{pix}} = 1280$), whereas $d\lambda_{\max} = 380$ nm with the smallest achievable grating period of two pixels. This provides a large number of wavelength band selections over the S , C , and L bands, as well as possible multiplexing between the 1300 and 1550 channels within metropolitan links.

A key point for the design of the LCDH WSS device is the location and the nature of the output fibers, to impose a particular wavelength response on a given channel. Custom SMF 2-D

arrays with large fiber count arranged in a radial configuration are then designed and fabricated.

V. CONCLUSION

We have demonstrated the potential of an optical routing module based on holographic beam steering using a LC spatial light modulator. The initial $1 \times N$ fiber space-switch configuration is shown to be versatile enough to offer more complex routing capabilities, such as multicast and wavelength-band selection. The use of a LCDH module here is a first attempt at merging space and wavelength routing operations in the same compact device.

Average insertion loss figure for the 14i-channel device of 6 dB (in protection mode) with a very low PDL were obtained. Constant improvement on the SLM—in terms of mirror quality and LC cell parameter control—as well as upgrades of the optomechanical alignment should rapidly lead to insertion loss values less than 4 dB.

Considering the device operation, establishing channel connections using an LCDH steering device is a one-step, highly reliable, and accurate operation, involving precomputed holograms which can be buffered offline and then rapidly loaded for various purposes. Interfacing the switch with upper system levels is thus an easy step.

The LCDH configuration was also shown to offer the capability of including both systems constraints (such as $1 + 1$ optical protection, multicast, and wavelength selection) and also to address physical constraints on the switching device (switch monitoring, crosstalk optimization, temperature drift compensation, etc.).

Finally, gathering all the device assessed properties will give rise to various innovative functionalities combining spatial and wavelength filtering or routing operations.

ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to thank L. Noirie (Alcatel Corporate Research Center) and P. Gravey (ENST de Bretagne) for valuable discussions concerning the application and CUED (Cambridge University, Engineering Department) for supplying the LCOS technology.

REFERENCES

- [1] P. Berthelé *et al.*, "Design and characterization of a LC SLM for a polarization-insensitive optical space-switch," *Appl. Opt.*, vol. 37, no. 23, pp. 5461–5468, 1998.
- [2] N. Wolffer *et al.*, "8 × 8 holographic liquid crystal switch," in *Proc. ECOC 2000*, Sept. 2000, pp. 275–277.
- [3] L. Y. Lin *et al.*, "MEMS for optical networking: Current status and future prospects," in *Proc. ECOC 2000*, Sept. 2000, p. 91.
- [4] W. A. Crossland *et al.*, "Beam steering optical switches using LCOS: The ROSES demonstrator," in *Inst. Elect. Eng. Electronics Communications Meeting*, London, U.K., Mar. 17, 2000.
- [5] U. Krishnamoorthy, K. Li, K. Yu, D. Lee, J. P. Heritage, and O. Solgaard, "Dual-mode micromirrors for optical phased array applications," *Sens. Actuators: A, Phys.*, vol. 97–98C, pp. 22–26, May 2002.
- [6] J. W. Goodman and A. M. Silvestri, "Some effects of Fourier-domain phase quantization," *IBM J. Res. Develop.*, vol. 14, no. 9, pp. 478–484, 1970.
- [7] B. Fracasso *et al.*, "Performance assessment of a liquid crystal multi-channel photonic space-switch," in *Photonics in Switching 2001 Tech. Dig.*, Monterey, CA, June 2001, pp. 24–26.

- [8] Y. A. Peter, "Micro-optical fiber switch for a large number of interconnects," PhD dissertation, Institut de Microtechnique, Université de Neuchâtel, Neuchâtel, Switzerland, Jan. 2001.
- [9] J. P. Laude, " $N \times N$ wavelength router, optical routing method and associated communication network," U.S. Patent 5.838.848, Nov. 17, 1998.
- [10] C. F. Lam *et al.*, "Programmable optical multicasting in a region: Metro area network using a wavelength selective optical cross-connect," in *Proc. ECOC'01*, Amsterdam, The Netherlands, Oct. 2001, pp. 614–615.
- [11] J. K. Rhee *et al.*, "Variable pass-band optical add-drop multiplexer using wavelength selective switch," in *Proc. ECOC'01*, Amsterdam, The Netherlands, Oct. 2001, pp. 550–551.
- [12] D. M. Marom *et al.*, "Wavelength-selective 1×4 switch for 128 WDM channels at 50 Ghz spacing," presented at the OFC2002, Anaheim, CA, Mar. 17–22, 2002.
- [13] J. P. Laude and S. Louis, "A new method for broadening and flattening the spectral shape of the transmission channels of grating wavelength division multiplexers (WDM) and routers," in *OECC'98, Tech. Dig.*, Chiba, Japan, July 1998, pp. 522–532.

B. Fracasso, photograph and biography not available at the time of publication.

J. L. de Bougrenet de la Tocnaye, photograph and biography not available at the time of publication.



M. Razzak was born in Rabat, Morocco, on November 5, 1975. He received the postgraduate degree in optoelectronics from the University of Liège, Belgium, and the Ph.D. degree in electrical engineering from the University of Rennes, Rennes, France.

His research activities include optical switching devices using liquid-crystal technology.



C. Uche received the Ph.D. degree from the Engineering Department, Cambridge University, Cambridge, U.K., and worked on a collaborative project between Ecole Nationale Supérieure des Telecommunications de Bretagne (ENSTBr) and the Cambridge University Engineering Department (CUED).

He is currently a Postdoctoral Researcher with the Engineering-Science Department at Oxford University, Oxford, U.K.

Silicon Backplane Ferroelectric Liquid Crystal Spatial Light Modulator for Uses Within an Optical Telecommunications Environment

K. HEGGARTY,¹ B. FRACASSO,¹ C. LETORT,¹
J. L. DE BOUGRENET DE LA TOCNAYE,² M. BIRCH,³
and D. KRÜERKE³

¹Optics Department, ENST Bretagne, BP 832, 29285 Brest Cedex, France

²Optogone, 305 rue Claude Shannon, 29280 Plouzané, France

³CRL Opto Limited, 1 St. David's Drive, Dalgety Bay, Dunfermline, KY11 9PF, Scotland

(Received in final form March 29, 2004)

Liquid crystal on silicon (LCOS) devices are ideal for uses as miniature light modulating elements. They can replace either transmissive LC (TFT) micro-displays or micro-mechanical MEMS and have been extensively used in display applications [1]. Pioneering works have proposed adapting them to implement optical communication functions such as optical spatial switches [2, 3]. For the first time to our knowledge, a industrial LCOS device has been specifically adapted for telecommunications uses only on a pre-industrial level. We discuss here the relevant specifications and present the optical performance of this preliminary "telco" LCOS prototype. The device is a silicon backplane SXGA ferroelectric liquid crystal spatial light modulator operating in the 1.5 μm telecom wavelength range. It is used as the beam steering core of an optical free-space switch whose optical and system test results are also presented.

Keywords SmC* Spatial light modulator; beam steering; optical switch

AIP PACS codes: 42.25 (wave optics); 42.40 (holography); 42.70 (Optical materials); 42.81 (fibre optics); 83.80Xz (liquid crystals)

1. Introduction

The next generation of very high bit-rate optical telecommunications networks is currently being investigated throughout the world. With current techniques of network management, the transmitted data has to be electrically regenerated at each network node (Fig. 1a). As increased optical transparency will be required at the network nodes, a key issue will be the availability of flexible all-optical switching modules (cf. Fig. 1b) meeting system and network requirements [4]. Free-space (or 3D) optics solutions using programmable micro-beam steering elements appear then to be an efficient solution to meet this need [2]. A large-capacity beam steering device first assumes a flexible and large-throughput interface with upper system levels. In practice, it requires a design compatible with VLSI circuit technology to avoid data transfer bottlenecks between the memory of the monitoring software and the micro-deflector array. Only two generic 3D optical technologies are VLSI-compatible so far: Micro Electro Mechanical Systems (MEMS) [5] and miniature silicon

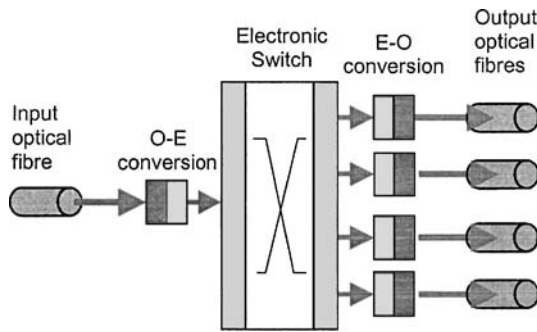


FIGURE 1a Electronic switching principle. The input optical signal is converted into an electronic signal to be spatially switched by electronic circuitry. The switched data are then re-emitted in the optical domain.

back-plane liquid crystal spatial light modulators (SLMs) [3], often referred to as reflective LCOS (Liquid Crystal On Silicon) SLMs. Both are well suited to the design and fabrication of large capacity 3D optical space-switches, requiring two-dimensional high-resolution beam-steering matrices. However, they are based on two different principles to route the light paths (Fig. 2): beam steering by a micro-mirror controlled in one or two angles and beam diffraction by a periodic grating displayed onto a pixellated liquid crystal SLM, which is one of the most flexible and efficient techniques to implement programmable gratings or, more generally, thin diffractive elements.

Both techniques have their own advantages: micro-mirror arrays have low loss and are intrinsically independent of the polarization and wavelength of the input light. These are both very important factors in modern optical telecommunications systems carrying many different wavelengths (WDM systems) whose polarization state can randomly vary. Despite higher loss and smaller optical bandwidth, LCOS holographic modules operate with no moving parts and can be used not only to steer optical beams but to combine several optical functions. These are output crosstalk minimisation, channel insertion loss correction (due to fibre misalignments and positioning tolerance), insertion loss equalisation or device monitoring. Such functionalities become crucial when a large output channel count (typ. several tens) is considered. This property is due to the large available spatial bandwidth of digital holograms. In addition, LCOS holographic modules make it possible to address several output fibres simultaneously, providing natural bridging capabilities, as well as to shift the spectral response of the selected optical output. These two points represent a decisive advantage over MEMS technology in terms of system flexibility. Illustrations

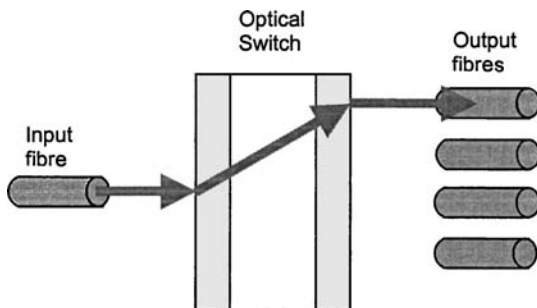


FIGURE 1b Optical switching environment. The space-switching operation is performed in the optical domain, with no intermediate electronic conversion.

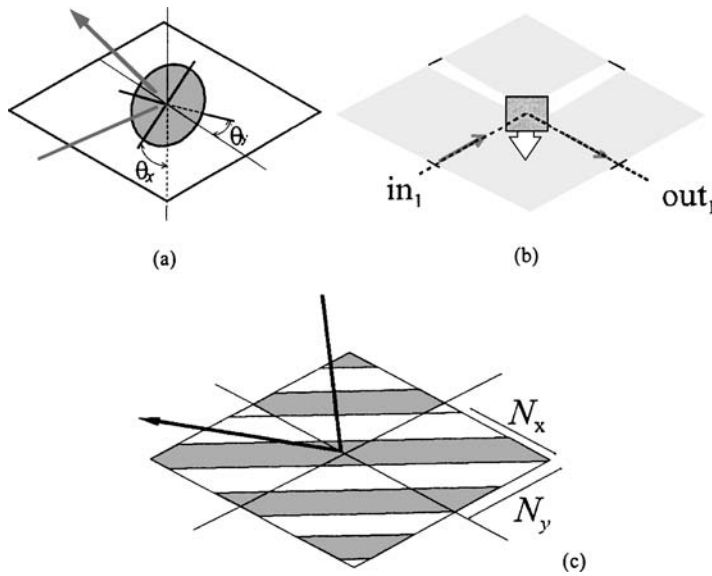


FIGURE 2 Different beam steering structures (a) 3D MEMS, (b) 2D MEMS, (c) Diffraction grating on SLM, with N_x , N_y grating pitch.

of some potential uses, corresponding to current demands in WDM systems, are given in reference [6].

In this framework, our paper presents the design, specification and experimented application of a FLCOS SXGA device specially adapted to perform such switching and routing functions in the $1.5 \mu\text{m}$ wavelength telecommunications range.

Section 1 presents the aimed $(1 \times N)$ switching function and the SLM requirements. Section 2 presents the tested SLM characteristics and section 3 gives experimental results, in the form of electro-optic and telecom measurements.

2. Optical Switch and SLM Specifications

2.1. Optical Space Switch—Basic Architecture

The device described here is a light beam micro-deflector based on diffraction. Its principle is shown in Fig. 3. The input fibre mode is imaged onto the targeted output fibre core using a basic $4f$ optical set-up. The intermediate beam deflection is performed by a liquid crystal

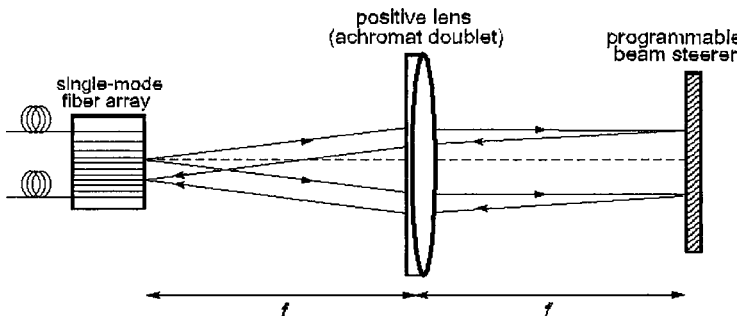


FIGURE 3 $1 \times N$ optical switch principle: reflective $4f$ (or telecentric) setup.

SLM displaying reflective phase gratings. Using the small angle hypothesis (valid here), the input light is deflected by a diffraction grating with spatial period p at an angle θ_d such that

$$\theta_d = m \cdot \frac{\lambda}{p} \quad (1)$$

where λ is the input light wavelength and m is an integer corresponding to the diffraction order used. In practice, we shall consider $m = 1$. The use of a reflective grating reduces the overall switch length to $2f$ and improves the alignment procedure, as the input and output fibres are located in the same fibre array holder.

Various phase modulations can be achieved depending on the liquid crystal choice. An almost continuous phase profile can be obtained with a nematic SLM, but the 2π phase modulation depth is polarisation dependant [7]. In contrast, the SmC* LC SLM used here in a particular cell configuration makes the device purely polarization insensitive [9], with switching time of a few hundreds of microseconds allowing a greater range of optical telecoms applications to be addressed. Although fast and fully polarization insensitive, this binary phase modulation scheme induces additional loss of about 3 dB (compared to the NLC scheme) due to the limited diffraction efficiency of binary phase gratings into the useful +1 order (theoretical maximum of 41%). Therefore, when considering both liquid crystal types for use in $1 \times N$ or $N \times N$ architectures, the above consideration makes the SmC* LC grating approach more appropriate for a single layer (i.e. $1 \times N$) switch implementation.

2.2. SmC* Polarisation Insensitive Binary Phase Grating Switch

As shown in Fig. 4, a Smectic C* cell is used here in a planar configuration (i.e. the director rotates in a plane perpendicular to the incident beam) and operates as a programmable wave-plate. The polarisation modulation is determined by the birefringence angle $\phi 2\pi d(n_o - n_e)/\lambda$ (d is the cell thickness), the tilt angle θ and the sign $k = +/ - 1$ of the electric field applied to the cell.

The advantage of this configuration is that it leads to polarisation insensitive phase modulators. This can be easily shown as follows. Using the Jones formalism and referring

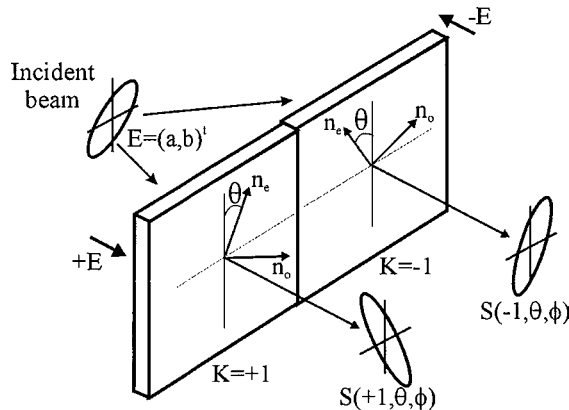


FIGURE 4 Modulation of the birefringence axes of the SmC* LC cell. The normal to the LC layers makes an angle $k\theta$ with the Oy axis of the polarisation frame; n_o and n_e are respectively the ordinary and extraordinary indices.

to the scheme in Fig. 4, an input polarisation state $E = [a, b]^t$ (“ t ” denoting the transpose operation) will be transformed by the LC cell in the output polarisation state $S(k, \theta, \phi)$ given by:

$$S(k, \theta, \phi) = \begin{pmatrix} a \cos\left(\frac{\phi}{2}\right) - ib \sin\left(\frac{\phi}{2}\right) \exp(2ik\theta) \\ -ia \sin\left(\frac{\phi}{2}\right) \exp(-2ik\theta) + b \cos\left(\frac{\phi}{2}\right) \end{pmatrix} \quad (2)$$

It can be shown from [9, 10] that if a “balanced” diffraction grating (periodic binary phase distribution with 50/50 duty cycle) is displayed on the device, the diffraction efficiency—which measures the percentage of incoming power deflected in the first diffraction order—is given by

$$\eta = \frac{4}{\pi^2} \sin^2(2\theta) \sin^2\left(\frac{\phi}{2}\right), \quad (3)$$

The deflection efficiency is hence independent of the input polarisation state $[a, b]^t$. An interesting case is the half-wave plate ($\phi = \pi$) configuration with $\theta = \pi/4$ tilt angle, for which the previous expression (3) is maximised to $4/\pi^2 = 41\%$.

This was illustrated in [4] with the design of a one-dimensional 1×14 optical space-switch operating at $1.55 \mu\text{m}$, using an electrically addressed reflective liquid crystal cell linear array (1×512 pixels) in this configuration. A custom design was used for the single mode fiber linear array. The output fiber core locations were determined according to two criteria: an optimum use of the SLM bandwidth (512 pixels with $15 \mu\text{m}$ pixel pitch) and the minimization of cross-talk levels, resulting from unwanted diffraction orders being coupled into non addressed fibers. This resulted in an irregular inter-fibre core spacing in the input/output fiber array, with an average value of $50 \mu\text{m}$. The device switching loss was tested for the 14 possible connections, over the [1520 nm–1570 nm] wavelength band, ranging from 8.5 to 10 dB. The measured polarization dependent loss (maximum PDL variation in system loss for different input polarizations—an important telecoms parameter) was less than 0.6 dB. The output isolation levels (cross-talk) between the addressed and non-addressed fibers varied between -45 dB and -21 dB, which couldn’t be considered as a good result, as crosstalk levels larger than -30 dB must be rejected in the context of optical transmission. However, this limitation was due to the one-dimensional geometry of the fibre array. It is clear that the problem can be solved by moving to a two-dimensional fiber array design. Of course, this also requires a 2D SLM, which is the main motivation for the work presented in this current paper.

The development of a specific backplane for an LCOS device for this application would involve costs beyond the means of the participants in this collaboration and probably make the whole approach uneconomic because of the high development costs that would have to be recovered. For this reason we chose to try to modify an existing device which most closely matched our needs, adapting the cell parameters (LC material, alignment layers, counter electrode) and drive electronics to the requirements of optical telecommunications.

2.3. SLM Requirements

As in display and military applications, optical communications impose specific operating constraints, some of them being real killing factors for applying technologies. All these

parameters will now be discussed in detail to emphasize the requirements for industrial manufacturing:

- The SLM must be optimised for operation at optical telecoms wavelengths, typically 1550 nm.
- The device should operate as a pure phase modulator to increase optical efficiency. Binary phase gratings (the type of diffractive structure to be displayed on the device) are in theory nearly 4 times more efficient than the corresponding amplitude gratings [11].
- The whole system must be polarisation insensitive (i.e. the total loss across the system should be the same for any input polarisation. A simple way of achieving this is for the SLM pixels to operate as a pure half-wave modulators.
- Optical transparency: there should be no time-fluctuations in the steered beam intensity, as it is used to carry a very high bit-rate digital signal (typ. several Gbit/s). This eliminates many LC switching and electrical refreshing regimes/schemes which generate transient states or modify the time dependence of the modulated wavefront, even at the microsecond scale.
- The switching speed should be as great as possible and in particular faster than 50 ns (imposed by the Synchronous Digital Hierarchy, SDH, telecommunications standards) to open the door to more varied optical telecommunications switching applications. This strongly suggests the use of FLC based SLMs.
- A new solution to the DC balance problem (particularly with FLC materials suggested by the previous point) must be implementable with the chosen SLM. In display applications the usual technique is simply to inverse the displayed image and to blank the display illumination at the same time. In our application a valid image (diffraction grating) must be present on the SLM at all times otherwise the optical link will be broken and with present optical telecommunications links operating at up to 1 THz even an interruption of a few microseconds would lead to a loss of large amounts of data.
- Some other constraints are imposed by our system architecture described in the precedent paragraph:
 - The SLM must be a 2D device with large number of pixels (preferably 1000×1000 or more) to be able to address a large number of output fibres (2D array) but also to enable coding of more complex diffractive designs which make the advanced functions (broadcast, band switching etc) possible.
 - The SLM cell should be as flat as possible and notably flatter than is usually required in display applications (not only should the cell gap be constant but the whole cell should be flat). This is because in the system described above, variations in the flatness of the cell will enlarge the diffracted spot in the output fibre plane. Since we must inject the light in the output plane into a monomode optical fibre (diameter ~ 10 microns) any deformation of spot shape or size will lead to reduced coupling efficiency and hence increased system loss.

3. SLM Adaptations

3.1. CRLOpto Standard Device and Characteristics

After a study of existing high speed, large pixel count 2D LCOS devices, we selected the SXGA device from CRLOpto Ltd as being the most closely suited to our needs. As far as our application is concerned the principal characteristics of this device are:

- Reflective FLC LCOS device.
- 1280×1024 pixel backplane.

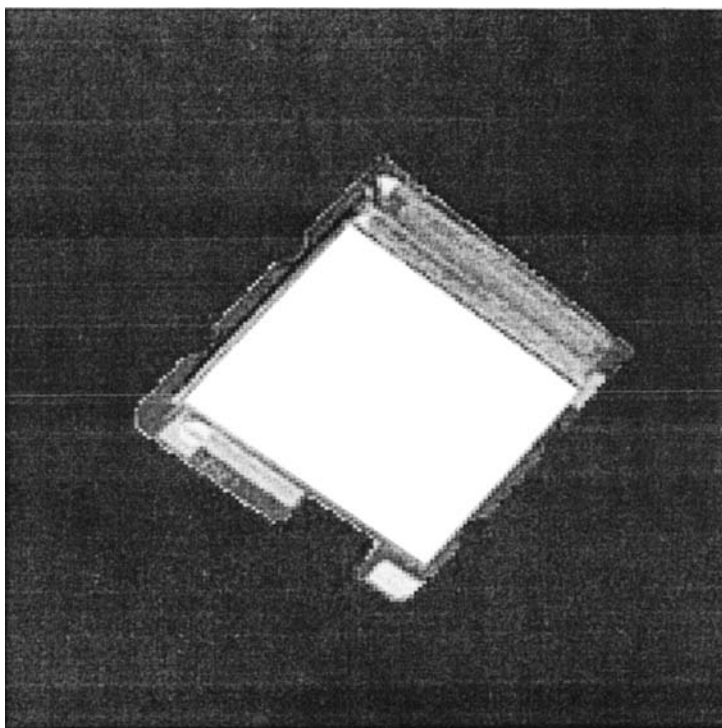


FIGURE 5 A standard (visible spectrum) CRLOpto SXGA device.

- 13.62 micron pixel pitch (square): 93% fill factor.
- >70% optical efficiency (defined as the percentage of the light falling on the active area of the device which is reflected and can be modulated).
- Optimised for binary amplitude modulation in the visible spectrum.
- Switching speeds $\sim 10 \mu\text{s}$.
- Digital Video Interface (DVI), 24 bit colour video frames at 60 Hz.
- Image inversion DC balance.

From these figures we can see that the CRLOpto device (Fig. 5) is indeed closely suited, with the required high pixel count, a suitable pixel size and switching speed. A number of modifications were, however, necessary to adapt the device to our optical telecommunications requirements. These modifications are now described.

3.2. Liquid Crystal Cell Fabrication

The standard CRLOpto SXGA device has a cell spacing and liquid crystal adapted to binary amplitude modulation in the visible spectrum. To adapt this to binary phase modulation at 1550 nm the cell spacing was changed by the use of appropriate spacers. Based on previous measurements of the refractive indices at 1550 nm of the liquid crystals used [2] spacers of near 3 microns were chosen. Several different types of liquid crystal were investigated in an attempt to obtain the required binary phase modulation at 1550 nm. Performance closest to that desired was obtained with the Chisso 2005 mixture (nominal tilt angle 43°). Modification of the standard alignment layers and LC alignment procedures were also necessary to obtain best performance.

3.3. Anti-Reflection Coatings

Since they are primarily intended for display applications the standard CRLOpto SXGA devices have a cover glass that has an AR coating on the external face optimised for low reflectivity across the visible spectrum and a relatively thick ITO layer to act as counter electrode on the internal face. To build our optical telecommunications optimised devices, new cover glasses were used with an AR coating optimised (reflectivity <1%) for wavelengths in the 1550 nm band and a thinner ITO layer since ITO absorbs more strongly in the IR than in the visible part of the spectrum.

3.4. Drive Scheme

One of the major attractions of the CRLOpto SXGA for us was the flexibility of its drive electronics. As explained above the desire for switching speeds of less than a few mS led to the choice of FLC based devices. This, however, leads to the problem of DC balance since in optical telecommunications applications a valid grating must be permanently present on the device to maintain the optical data link. The usual “image inversion” technique used in display applications is not acceptable since while the image is being inverted a invalid image is displayed and the optical data connection cut.

To get round this problem the CRLOpto SXGA drive electronics were modified and reprogrammed to implement a “sliding grating” scheme. This scheme, shown schematically in Fig. 6a is based on the fact that a laterally shifted diffraction grating will diffract light in the same direction as an unshifted grating—hence in our optical setup a shifted grating will still diffract light into the same output fibre. Also, since the grating is binary and periodic, if such a grating is displayed on an FLC device and the grating is laterally shifted by a half period then overall each pixel of the device will be DC balanced since it will spend an equal time in both states. Hence by successively displaying a series of spatially shifted versions of the desired grating for equal durations we can ensure that the device is DC balanced and that a valid grating is always present on the device so that the optical data connection is maintained.

The only slight complication comes during the transitions from one grating to the next shifted version. If the whole grating was updated at the same time since each pixel requires a finite time to change states (limited by the LC switch speed) then all the pixels would be in an undefined state during the switch and no valid grating would be present resulting in loss of the transmitted data. Instead at any one time we only update the grating in a given narrow window (see Fig. 6b). Below this window a valid grating (grating “*n*”) is present and

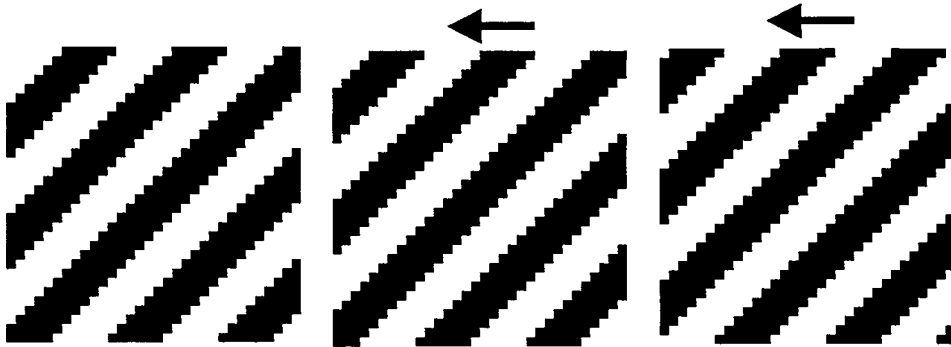


FIGURE 6a The sliding grating scheme. All three gratings will diffract light in the same direction.



FIGURE 6b The sliding grating scheme. A narrow window of updating pixels slides down the displayed image to change the image.

above another valid grating (grating “ $n + 1$ ”) is present so the incoming light is diffracted to the desired output fibre. The narrow window of updating (undefined state) pixels gradually sweeps down the display to update the whole image. In this way only a small proportion of the SLM pixels are ever in an undetermined state and a valid grating is continually present on the major part of the SLM. The only effect of this “ripple down” window is a minor drop in grating diffraction efficiency producing a slight increase in system loss while the window is rippling down—such a loss is far more acceptable in optical telecommunications systems than the complete cut in the optical link that a synchronous SLM update would produce.

In order to minimise the modifications to the SXGA drive electronics, the shifting grating scheme was implemented within the framework of the current Digital Video Interface (DVI) format. The different shifted versions of the binary grating to be displayed were loaded into the 24 bitplanes of the DVI format and these bitplanes were then displayed in rotation being updated using the “ripple down” window technique to give the overall DC balance. It should be noted that this requirement for the DC balanced grating sequences to fit into 24 bitplanes imposes some constraints on grating type. For the scheme to produce a correct DC balance, either the X or Y period of the grating must be divisor of 24. In practice other constraints (crosstalk, aberrations . . .) are the limiting factors on the number of output fibres so this is not a major constraint. Also, with the slightly more involved modification of the drive electronics planned for future versions, the 24 bitplane constraint will be removed completely and the system will be able to display gratings of any period correctly.

4. Experimental Results

The experimental testing of the optical telecommunications optimised devices was performed at several levels. First of all through measurements of the electro-optical characteristics of the test devices: tilt angle, switch speed, contrast vs drive voltage, temperature dependence. When these results became encouraging, gratings were displayed on the devices and their diffraction efficiency in the visible and at 1550 nm was measured. Finally, once acceptable diffraction efficiency measurements were obtained, the devices were placed in the optical switch setup and telecommunications measurements were made: insertion loss, bandwidth, PDL, Bit Error Rate penalty etc.

4.1. Electro-Optical Measurements

The initial electro-optical measurements were made in the visible using a polarisation microscope with a temperature controlled stage, filtered white light source and a photodetector. Figure 7 shows a typical structure of an aligned cell showing the pixelated backplane, spacers and the relatively large domain structure obtained. While such domain structures are

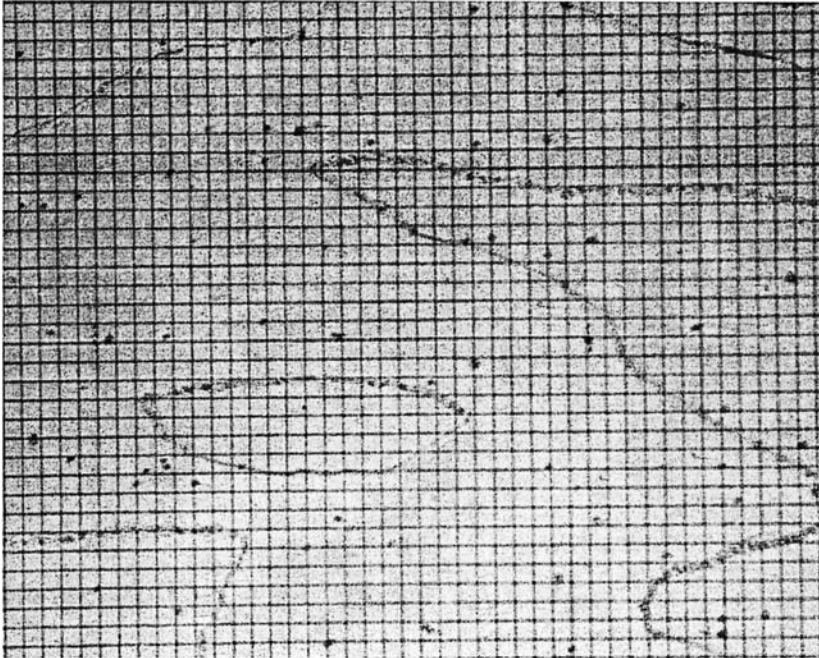


FIGURE 7 Microscope view of a typical SXGA cell alignment with Chisso 2005.

potentially problematic for display applications they present no major problem in our application where the device is used to display diffractive structures and only the diffracted field is of interest.

Figure 8 shows the switching angle vs temperature for a typical cell. Since for our application we require a pure binary phase operation we are looking for a π overall cell retardation, i.e. a switch angle of 90° . We can see that with the Chisso 2005 material in our configuration this occurs at around 45°C . This is not a major drawback as such backplanes tend to run naturally at temperatures near this point and in any case, as we shall see below, temperature also affects other factors more importantly.

Switching speed was also measured. Typical 10%–90% switching speeds were around $750\ \mu\text{s}$ at 35°C , markedly slower than those obtained with standard display-optimised CRLOpto SXGA devices where switching speeds of the order of $10\ \mu\text{s}$ are obtained. Several factors explain this difference: the Chisso CS2005 is a harder compound to switch, particularly since the switch angle is greater, the cell thickness is considerably greater than usual since it is optimised for π retardation at $1550\ \text{nm}$ instead of $\pi/2$ retardation in the visible (but the backplane supplied voltage is the same) and finally the switching speed is temperature dependent, increasing notably for temperatures up to 55°C . While a drawback with the use of the sliding grating switching scheme (explained in detail below) switching speeds of this order are still below the network requirements, especially the $50\ \text{ms}$ reconfiguration time in SDH networks.

4.2. Diffraction Measurements

To measure the diffraction efficiency of the test devices the optical setup shown in Fig. 9 was used. A weakly converging expanded laser beam, either HeNe ($633\ \text{nm}$ for preliminary setup) or IR ($1550\ \text{nm}$) is used to illuminate the devices. The devices are orientated at a

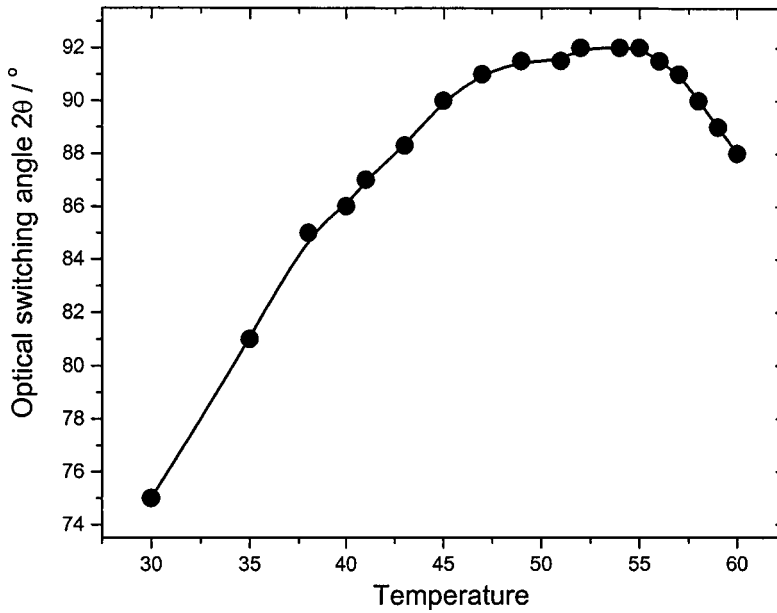


FIGURE 8 Plot of switching angle against temperature.

slight angle to the incoming beam so as to reflect and diffract the light back into a series of diffraction spots to the side of and behind the light source. The diffraction patterns are observed and a photodiode positioned on the various diffraction spots to measure the light intensity diffracted in the useful orders. Diffraction efficiency figures are obtained by dividing these spot intensities by the input illumination intensity. The intensity falling on the device is measured by removing the device and replacing it with the detector and modifying the incoming light convergence to ensure that all of the incoming light falls on the detector—a fixed diaphragm placed before the converging optics ensures that the incoming light quantity remains constant. Both the IR and visible sources are intensity stabilized.

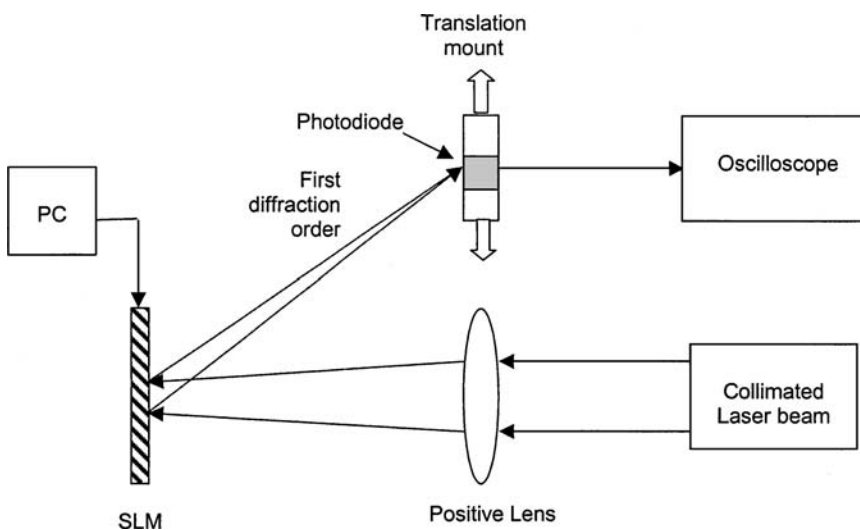


FIGURE 9 SLM diffraction efficiency measurement setup.

In this way the DE (diffraction efficiency) measurements are accurate reflections of those pertinent to the final application—with the exception that the truly normal incidence in the final setup should lead to slightly improved DE—in practice the small angles used here mean the differences are small. The SLM was driven from a PC with a dual head video card, the DVI output being sent to the SLM via the interface electronics and the image control software output being sent to the usual PC monitor head.

The first measurement we made concerned the overall device reflectivity. An all white image was sent to the SLM, the total reflected light intensity measured and compared to the light intensity falling on the SLM. For the test devices made typical IR reflectivities ranged from 55 to 65%, for the standard production devices reflectivities of the order of 70–75% are typical. The difference is likely to be due to the lower ITO transmittance in the IR, the spacers (standard devices have built in spacers in the inter-pixel gaps) and an imperfect AR coating. The results are however already acceptable for our application and are improvable for future versions.

With grating patterns displayed on the SLMs, measured diffraction efficiency varied with temperature, drive scheme (standard image inverting video or sliding grating) and grating type. With the standard drive scheme at 35°C diffraction efficiencies ranged from 15–17% and at 55°C from 20–23%. The primary reason for this difference becomes clear when we consider Fig. 10. The first trace (upper) of diffracted intensity for a standard SXGA cell shows a nearly flat trace (grating image displayed continuously) with a few sharp downward spikes corresponding to the image inversions. The switching speed of such cells being in the 10 μ s range, the image inversion time is short compared to the time between inversions. The thicker Chisso 2005 filled IR optimised devices switch much more slowly (750 μ s) and hence do not have the time to switch fully between image inversions. The LC molecules never reach the full switch angle so the optimal phase retardation is never reached and the grating never reaches full diffraction efficiency. The second trace of Fig. 10 confirms this explanation. When heated to 55°C, the LC switches faster, spending more time in the fully switched state and reaching the desired switching angle, hence the increase in diffraction efficiency at 55°C.

The third trace of Fig. 10 corresponds to the diffracted intensity when the sliding grating drive scheme is used (note that the trace is not on the same scale). We see that it is much flatter (there are no downward spikes) indicating that as required the continuous optical connection is maintained. The transitions are spread out to slight dips in the detected intensity as the update window “ripples down” the SLM. The depth and duration of these dips was successfully controlled by modifying the size of the “update window” and the “ripple down” speed to the extent that the effect on the data transmitted across the switch became negligible (see next section). The fact that with the sliding grating scheme the updating part of SLM does not contain the desired grating reduces the overall diffraction efficiency compared to the static state diffraction efficiency for the standard drive scheme. The effect is slightly grating dependent since for short spatial period gratings the difference between the successive shifted versions of the gratings are proportionally greater. Our measurements indicate an additional 1 to 2% penalty in diffraction efficiency for long period gratings rising to 8–9% for very short period gratings (2 pixels/period). In practice this is not a drawback as the short period gratings are not used for other reasons: they correspond to the outermost fibres in the output array which are the most sensitive to alignment and lens aberration problems and also increase the overall dimensions and cost of the array. For these reasons such gratings are deliberately avoided in the switch design.

In conclusion, while 20–23% diffraction efficiencies may seem low, in fact in this context they correspond to a very useful result—especially since they are absolute

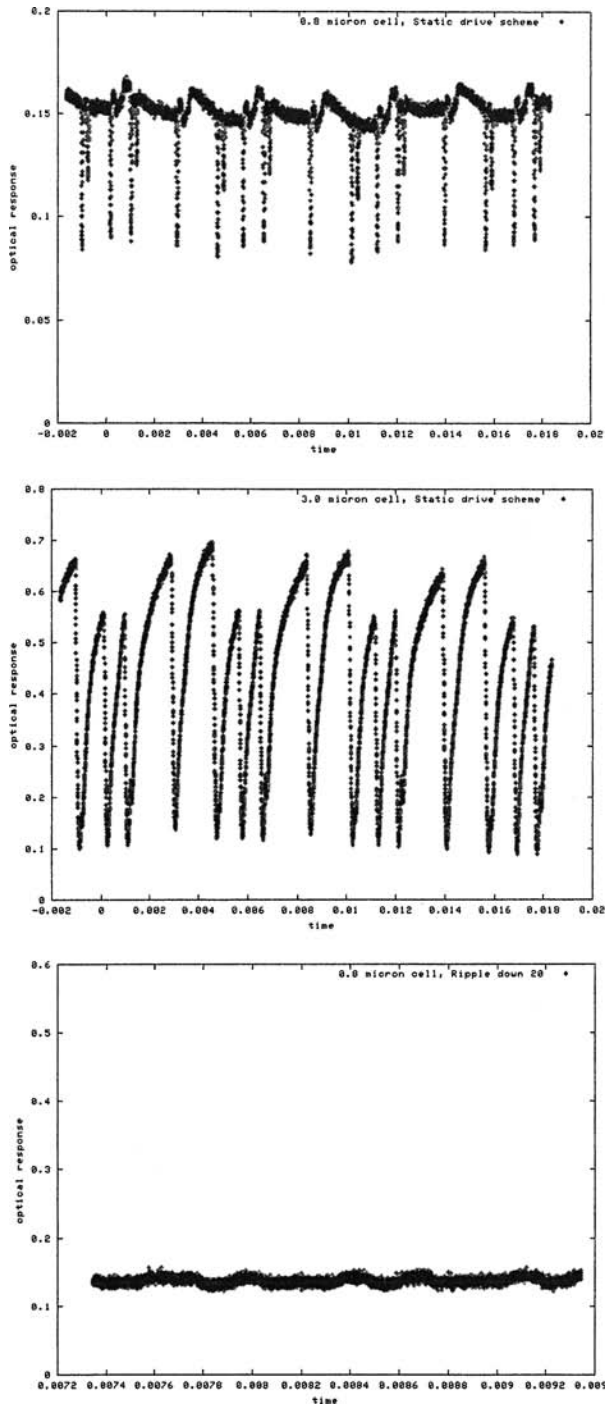


FIGURE 10 Oscilloscope traces of 1st order diffracted intensity in the visible. Top—the usual DC balanced video drive scheme and a standard thickness (visible) cell. Middle—the usual DC balanced video drive scheme and a thicker (IR optimised) cell. Bottom—IR optimized cell with the sliding grating drive scheme.

measurements: output spot intensity divided by the light intensity falling on the device. The theoretical maximum for a perfect binary phase diffraction grating is 41% and we know that the overall optical efficiency is no more than 65% so the best achievable result is about 26%. Even with the highly optimised standard device, because of ITO absorption and fill factor, optical efficiency is about 75% so a diffraction efficiency of 30% is the maximum practically attainable with a fully optimised device. In such a context diffraction efficiencies of 20–23% are a considerable achievement.

4.3. Optical Communications Tests

The SXGA SLM was then inserted in a fibre-to-fibre switching setup (as in Fig. 3) to measure its ability to switch multi-gigabit optical space channels in a transparent manner. Hence, different “system” parameters must be evaluated for successive connection gratings. If p denotes the SLM pixel pitch (assumed to have a square shape), a two-dimensional connection grating will be determined by its spatial periods $P_x = N_x p$ and $N_y p$, with N_x and N_y the number of pixels per period in each dimension. Then for a set of ten (N_x, N_y) gratings, with $4 < N_x, N_y < 24$, we measured :

- a) the fibre-to-fibre insertion loss IL
- b) the PDL, i.e. the IL variation for orthogonal polarisations
- c) the Bit Error Rate (BER) of the output (switched) channel. This involves modulating the input optical beam with a high bitrate binary sequence. The modulating sequence and the sequence transmitted through the system are compared and the number of differences between the two sequences is counted. This measurement is of chief importance to determine whether or not the device correctly transmits data, i.e. with no bit errors.

The measured fibre-to-fibre IL ranged from -9 to -10 dB at the operating temperature of 35°C . This figure partly comes from the diffraction efficiency value of 16% (measured in section 4.2), corresponding to a -8 dB loss. The average excess loss of 1.5 dB can be explained by opto-mechanical misalignments and a limited SLM flatness. One possible explanation for the excess loss is the SLM flatness. In display applications SLM flatness is

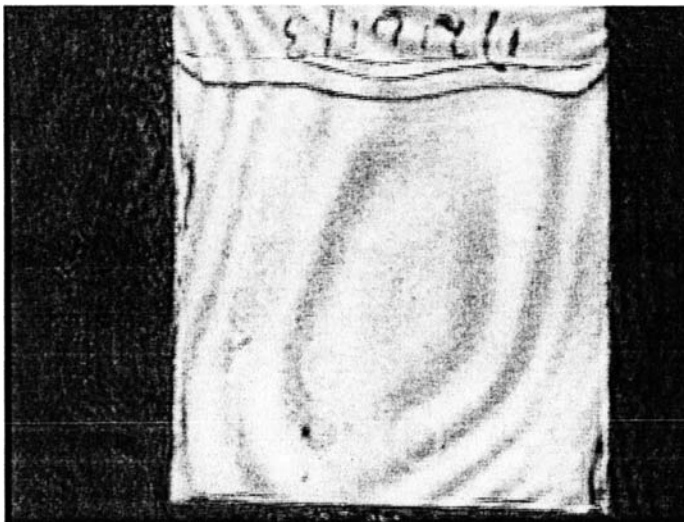


FIGURE 11 Interferogram (visible light) of a FLCOS cell.

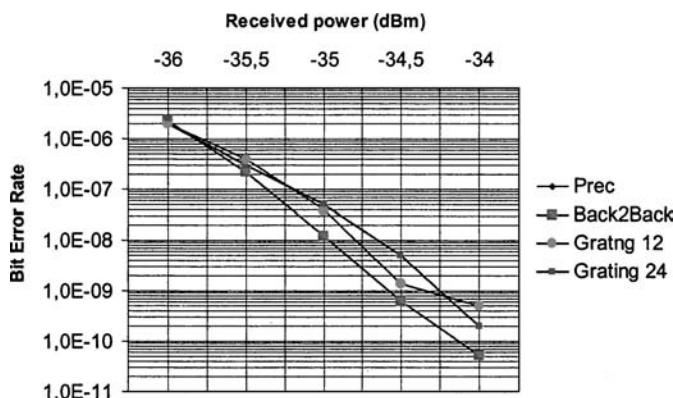


FIGURE 12 BER test results.

important to the extent that the cell gap should be constant across the device to give a good contrast uniformity. A slight overall curvature of the device is rarely a problem as long as the cell gap is constant. In diffraction applications such as ours however the device flatness is important. Since the diffracted pattern has a Fourier Transform relationship with the light distribution on the SLM, the output spot shape is the convolution of the light distribution exiting from the input fibre and the 2D Fourier Transform of the SLM phase profile. If the SLM is flat, the convolution essentially reproduces the light distribution exiting from the input fibre which is precisely the wavefront required to optimise coupling efficiency into the output fibres. If however, the SLM is not flat, the convolution will deform the output spot and coupling efficiency will be reduced. Figure 11 shows an interferometer view (at a wavelength of 633 nm) of one of our test cells. We can see a few fringes indicating that the device is not perfectly flat and this will have a negative effect on the coupling efficiency. In a future version we plan to use thicker, flatter cover glass which should improve device flatness and hence coupling efficiency.

Our basic PDL measurement setup led to values under 1 dB, with a limited accuracy (± 0.5 dB). This point is currently being investigated further as the maximum tolerated PDL value in such systems is about 0.3 dB.

BER measurements results obtained using the ENST Bretagne characterisation facilities are shown in Fig. 12. The two connection gratings considered here (12 and 24 pixels per period) generate a power penalty smaller than 0.6 dB at a bitrate of 10 Gbit/s. This value is acceptable for optical transmission, and will be improved by a proper optimisation of the sliding grating addressing scheme, with the purpose of decreasing the time fluctuations observed Fig. 10. As expected, an increased power penalty (> 1 dB) has been noticed for small grating periods (typ. < 6 pixels per period).

At the moment of writing, the designed 2D fibre array has not yet been integrated into the system. The results shown below were therefore obtained using independently movable input and output fibres to simulate the relative positions in the 2D array

5. Conclusion

In this paper we have demonstrated to our knowledge the first 2D commercial backplane based FLC LCOS device specifically tailored to operation in the optical communications wavelength range. By tailoring cell gap, liquid crystal type, anti-reflection coating and ITO layer to these wavelengths we have been able to build binary phase modulating devices

with high diffraction efficiencies (up to 23% into each useful order to be compared with a maximum possible 30%) and showing a high degree of insensitivity to the polarisation of the incoming light. Switch times were slower than with standard visible spectrum optimised devices ($750 \mu\text{S}$ vs $20 \mu\text{S}$) but are still fast enough to address many of the useful telecommunications applications requiring switching at rates faster than those obtainable with current nematic LC devices.

By modifying the device drive scheme and drive electronics we were able to overcome the DC balance problem inherent in FLC devices by implementing a sliding grating scheme that is compatible with the optical telecommunications requirements of a suitable diffraction grating image being continually present on the device so that the optical data path is never cut. This scheme has been shown to introduce only a small diffraction efficiency penalty compared to the standard image-inversion DC balance technique.

We incorporated the device into a preliminary version of an optical telecommunications switch linking two optical fibres and tested the system's telecommunication performance by transmitting 10Gbit data signals through the system. The Bit Error Rate (BER) penalty introduced by the system was measured at 0.6 dB,—indicating that the switch architecture, LCOS device and sliding grating drive scheme all function together correctly to transmit optical telecommunications data. A fibre to fibre loss of around 9 dB was obtained which should be improvable to 7.5 dB (already interesting from a telecommunications viewpoint) by running the device at the optimal temperature (50°C) for diffraction efficiency and perhaps further with optically flat cover glasses. Polarisation Dispersion Loss (PDL) was also found to be low (<1 dB): an encouraging result for a first batch of devices although further work will be required on this point to reach typical telecommunications specifications.

Future planned work is to incorporate the LCOS device in a full switch architecture with a optimised 2D array of monomode fibres to fully demonstrate the high output port count capacities of our 2D LCOS modulator. A more extensive modification of the drive electronics is planned in the longer term to overcome the current limitations on the types of grating that can be displayed on the device—at present the need to drive the device via video signals imposes slight limitations. Other planned work on the fully integrated switch concerns using the device to display advanced diffractive structures which allow more sophisticated telecommunications functions such as broadcast (one-to-many fibre connections) or wavelength channel switching (using the chromaticity of the diffracting structures for outer array fibres) to be studied.

References

1. K. M. Johnson, D. J. McKnight, and I. Underwood, *IEEE Journal of Quant. Electr.* **29**(2), 699–714 (1993).
2. P. Berthelé, B. Fracasso, and J. L. de Bougrenet de la Tocnaye, *Appl. Opt.* **37**(23), 5461–5468 (1998).
3. W. A. Crossland, I. G. Manolis, M. M. Redmond, K. L. Tan, T. D. Wilkinson, M. J. Holmes, T. R. Parker, H. H. Chu, J. Croucher, V. A. Handerek, S. T. Warr, B. Robertson, I. G. Bonas, R. Franklin, C. Stace, H. J. White, R. A. Woolley, and G. Henshall, *IEEE Journ. Lightwave Technol* **18**, 1845–1853 (2000).
4. B. Fracasso, L. Noirie, J. L. de Bougrenet de la Tocnaye, M. Razzak, and E. Daniel, in *Photonics in Switching Techn. Digest* 24–26 (2001).
5. L. Y. Lin and E. L. Goldstein, *Proc. ECOC* **4**, 91 (2000).
6. B. Fracasso, J. L. de Bougrenet de la Tocnaye, M. Razzak, and C. Uche, *IEEE Journ. Lightwave Technol.* **21**(10), 2405–2411 (2003).

7. N. Wolffer, B. Vinouze, R. Lever, P. Gravey, and L. Bramerie, *Proc ECOC* **3**, 275–276 (2000).
8. P. Gravey, J.-L. de Bougrenet de la Tocnaye, B. Fracasso, N. Wolffer, B. Vinouze, M. Razzak, and A. Kali, *Annals of Telecommunications* **59**, 1378–1400 (October 2003).
9. S. T. Warr and R. J. Mears, *Electr. Lett* **31**(9), 714–716 (1995).
10. M. Le Doucen and P. Pellat-Finet, *Opt. Comm.* **151**, 321–330 (1998).
11. H.-P. Herzig, *Micro-optics: Elements, Systems and Applications* (Taylor and Francis, London, 1997).

Design and fabrication of a high-density 2D fiber array for holographic switching applications

Cedric Letort
Bruno Vinouze
Bruno Fracasso
 ENST Bretagne
 Optics Department
 UMR 6082 Foton
 CS 83818-29238, Brest Cedex 3, France
 E-mail: cedric.letort@enst-bretagne.fr

Abstract. Holographic two-dimensional beam steering using a pixelated spatial light modulator (SLM) is a flexible and accurate technique to implement advanced space-switching, building-block functions for optical network nodes. We present the design of a specific fiber array for large-capacity holographic switches. We use two-dimensional and irregular array topology to optimize the space-bandwidth product of the SLM and to avoid crosstalk due to the coupling of higher diffraction orders. The fiber-array module is integrated by inserting the fibres through a pair of etched silicon plates aligned and fixed using a steel mount. The device is tested through near-field and fiber-to-fiber free space coupling tests. An average fiber-to-fiber insertion loss of 1 dB is achieved for a prototype containing 64 fibers. © 2008 Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers. [DOI: 10.1117/1.2911718]

Subject terms: optical fiber array; wavelength-selective switch; spatial light modulator; liquid crystal spatial; light modulator; binary-phase hologram.

Paper 070648R received Aug. 1, 2007; revised manuscript received Nov. 21, 2007; accepted for publication Jan. 2, 2008; published online Apr. 30, 2008.

1 Introduction

In the last few years, dense wavelength-division multiplexed (DWDM)-based optical telecommunications networks have been massively deployed to face the dramatic traffic rise generated by Internet services. The introduction of transparent cross-connecting nodes in the optical network is increasingly put forward to obtain more flexibility and reconfigurability at the optical layer.¹ A key issue then is the availability of flexible all-optical switching modules, in which different operations are implemented, such as space routing, wavelength extraction, or power equalization.

In this context, the wavelength-selective switch (WSS) appears as a key technology that performs both selective routing and dynamic power control of the optical channels.² Although planar lightwave architectures³ yield WSS implementations with high density integration, free space-based solutions are currently the most promising in terms of insertion loss (≈ 5 dB), channel isolation (40 dB), and polarization sensitivity ($\text{PDL} \leq 1$ dB). Technologically speaking, the dynamic spatial-routing function of the optical channels is performed through beam deflection using either micro-electromechanical systems (MEMS) mirror arrays⁴ or a two-dimensional liquid crystal spatial light modulator (LC-SLM).⁵

Within that frame and before the advent of WSS, holographic beam steering using LC-SLMs had been demonstrated as an interesting technique to increase the accuracy, repeatability, and stability of micro-beam steerers within optical space switches.^{6,7} Optical space switching was also backed up with dynamic wavelength-filtering capabilities. This was demonstrated for a one-dimensional 1×14 holographic switch exhibiting 8.5-dB loss with multicast

capabilities.⁷ The major limitation was a rather poor channel isolation level (-21 dB max), due to a one-dimensional beam steering and fiber array geometry. Moving to a two-dimensional geometry was then considered a decisive option to increase the switch capacity while decreasing the cross-talk levels. The first step has already been performed with the specific adaptation of a two-dimensional LC-SLM for telecommunications uses on a pre-industrial levels.⁸ The device was a silicon backplane 1280×1024 pixel (SXGA) ferroelectric spatial light modulator operating in the $1.55\text{-}\mu\text{m}$ wavelength range. The second step consists of designing and fabricating a 2D fiber-array structure providing high-capacity and low-crosstalk values in the present holographic beam-steering configuration. This will be presented throughout this paper, which is organized as follows: The diffraction model for holographic beam steering is presented in Section 2 to describe the diffraction orders distribution impinging onto the output plane (replay field). This determines the constraints for the fiber-array design algorithm. Section 3 presents the design and fabrication of a specific 2D fiber-array prototype meeting the capacity and crosstalk requirements. The component is then tested and the experimental results are presented in Section 4.

2 Fiber-Array Custom Design

2.1 Holographic Switching Setup

The principle of a $1 \times N$ holographic optical space switch^{6,7} is depicted in Fig. 1. The input fiber mode is imaged onto the targeted output fiber core using a folded telecentric optical setup ($4f$ architecture). The positive lens is an achromat doublet coated with a $1.5\text{-}\mu\text{m}$ antireflection layer, whose focal length and numerical aperture are determined to minimize aberration and vignetting of the expanded fiber-mode field. The intermediate beam deflection is performed by a reflective LC-SLM displaying phase gratings

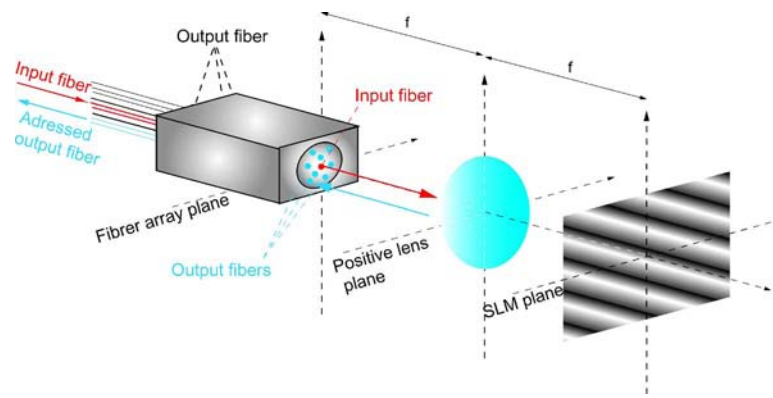


Fig. 1 Reflective holographic space-switch architecture.

(or holograms), which, since the input and output fibers are located in the same fiber array holder, permits us to limit the switch length while improving the opto-mechanical alignment procedure. The angular deviation resulting from the beam passing through the hologram is transformed into a spatial offset at the output (replay) plane. Overall, this system can be considered a fiber spatial correlator. Compared to MEMS reflective techniques, diffractive beam-steering provides motionless and high-capacity space-switching with wavelength-band selection capabilities.⁷ Both techniques have their own advantages: Micro-mirror arrays have low loss and are intrinsically independent of the polarization and wavelength of the input light. On the other hand, LC holographic modules operate with no moving parts and can be used not only to steer optical beams but also to address several output fibers simultaneously, providing natural channel-bridging capabilities, as well as to shift the spectral response of the selected optical output.⁷ These two points represent a decisive advantage over MEMS technology in terms of system flexibility.

Using liquid crystal technology, various phase modulations can be achieved depending on the LC material choice. An almost continuous-phase profile can be obtained with a

nematic LC, but the phase modulation depth is polarization-dependent. In contrast, a Smectic C liquid crystal—often referred to as ferroelectric liquid crystal (FLC)—makes the device purely polarization-insensitive, with a switching time of a few hundreds of microseconds,⁶⁻⁸ but to the detriment of diffraction efficiency. The recent introduction of 2D-LCOS (Liquid Crystal on Silicon) SLM devices operating in the 1.55- μm telecommunication window for both WSSs⁵ and holographic switches⁸ makes the design of large-capacity (i.e., output port count >100) devices possible.

In that framework, a key step is the design of an optimized 2D single-mode fiber array that takes advantage of the high-output port count addressing capabilities of holographic deflectors.

2.2 Holographic Beam-Steering Model

A detailed analysis of the optical reconstruction generated by pixellated and phase-quantized LC-SLMSs can be found in the literature.⁹ We shall briefly present the reconstruction model for binary and pixellated hologram patterns with the purpose of determining the relevant steering parameters,

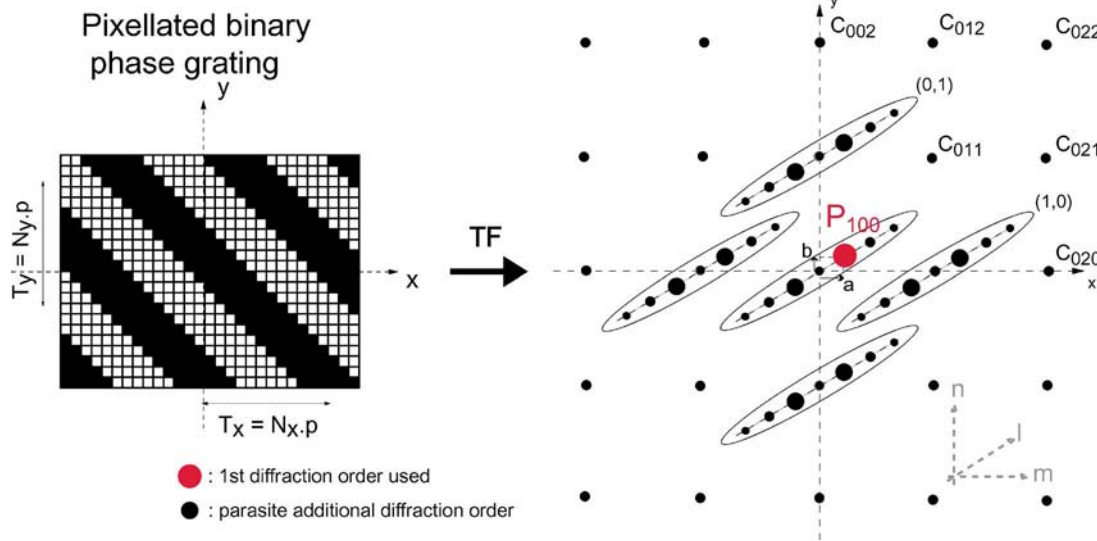


Fig. 2 Three-dimensional higher diffraction order distribution generated by a binary-phase 2D grating.

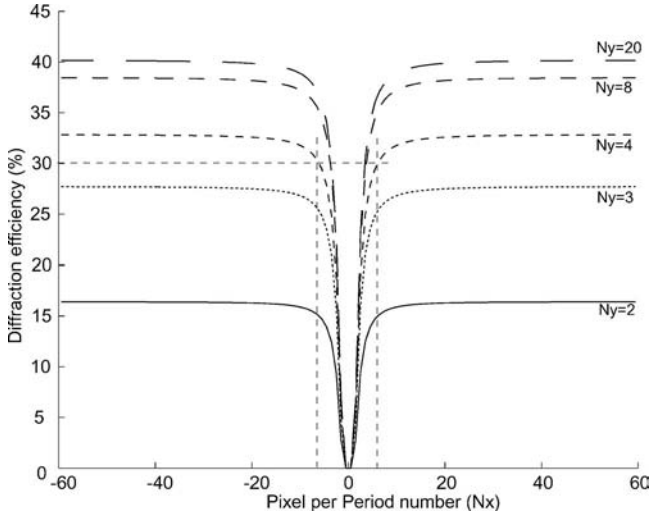


Fig. 3 Diffraction efficiency evolution versus pixel per period number N_x as a function of N_y . Negative values correspond to symmetric gratings with respect to the y -axis.

namely the intensity and location of the higher diffraction orders. Using this information, we will be able to derive the beam-coupling ratio at any position of the output fiber plane and hence design a 2D fiber-array topology that minimizes the holographic switch crosstalk. Geometrical constraints like aberration and vignetting at the Fourier lens will have a limited influence if the optical setup is properly designed.⁷ These parameters will hence not be considered in the model. The ideal routing holographic pattern is the blazed grating hologram that produces a unique replay of the input fiber mode at a given output fiber location. More precisely, if (a_j, b_j) are the coordinates of the j th output fiber (i.e., the core center location), the two-dimensional information to be displayed at the SLM plane is the periodic phase-only distribution given by

$$H(x, y) = \exp\left\{-\frac{2i\pi}{\lambda f}(a_j x + b_j y)\right\}, \quad (1)$$

where λ and f denote, respectively, the wavelength and the focal length. The spatial periods in the x and y dimensions are given by $T_x^j = \lambda f / a_j$ and $T_y^j = \lambda f / b_j$. The encoding of distribution (1) onto a pixellated binary-phase function is required to physically display the steering information onto an FLC-SLM. This operation can be represented by a procedure involving three steps. The phase of the steering

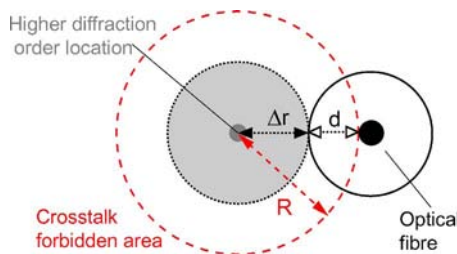


Fig. 4 Exclusion disk method to remove potential crosstalk positions from the fiber location search space.

function H is first quantized by comparing the real part $\Re(H)$ of the complex function to a threshold level τ . The resulting binary phase grating H^q takes the ϕ phase level if $\Re(H) < \tau$ and the $\phi + \pi$ value otherwise. The τ value controls the compression ratio α of the binary grating H^q . The optimized case is $\tau=0$ as it yields a balanced grating with $\alpha=0.5$, and hence no energy in the zeroth diffraction order. Then, the pixellation and dead-space (interpixel) effects are introduced. If we consider a pixel pitch value of p and a pixel size of p_0 ($p_0 < p$ is the size of the modulating pixel zone), the holographic steering distribution $H^s(x, y)$ will result from a multiplication of H^q with a 2 Dirac distribution $\text{III}_p(x, y)$ (p is the pixel grid/pitch), followed by the convolution of the result with a square distribution II_{p_0} of size $p_0 \times p_0$, representing the pixel shape. The SLM fill factor is given by the ratio $F = (p_0/p)^2$. This finally gives us

$$H^s(x, y) = \{H^q(x, y)\text{III}_p(x, y)\} * \prod_{p_0}(x, y), \quad (2)$$

where $\text{II}_{p_0}(x, y) = 1$ if $|x| \leq p_0$ and $|y| \leq p_0$, and $\text{II}_{p_0}(x, y) = 0$ elsewhere, $*$ standing for the convolution operation. The SLM limited size will be discussed later. Note from relation (2) that the grating periods T_x and T_y are now quantized by the pixel pitch p in the form $T_x = pN_x$ and $T_y = pN_y$, with N_x and N_y the number of pixels per period in each dimension. The relative complex amplitudes C_{lmn} and positions P_{lmn} of all the replay orders can be determined by calculating the Fourier transform $\tilde{H}^s(\mu, \nu)$ of $H^s(x, y)$ from (2), yielding,¹⁰ for $l \neq 0$,

$$C_{lmn} = \kappa \text{sinc}(\alpha l) \text{sinc}\left\{\sqrt{F}\left[m + \frac{1}{N_x}\right]\right\} \text{sinc}\left\{\sqrt{F}\left[n + \frac{1}{N_y}\right]\right\} \text{ and } P_{lmn} = \left(\sigma\left[m + \frac{1}{N_x}\right], \sigma\left[n + \frac{1}{N_y}\right]\right), \quad (3)$$

where $\text{sinc}(x) = \sin(\pi x) / (\pi x)$, $\kappa = 2\alpha F$, and $\sigma = \lambda f / p$.

As illustrated in Fig. 2, relation (3) represents a three-dimensional diffraction-order (l) distribution, where the replication is caused by the phase-level binarization, while the spatial quantization operation (pixellation) produces the 2-D replication along with the m and n directions. Due to the spatial convolution generated by the $4f$ optical setup, the input fiber mode will be spatially convolved with the $\tilde{H}^s(\mu, \nu)$ distribution, yielding a constellation of weighted and shifted replications as given by relation (3). The ($l = 1, m = 0, n = 0$) term is the main “peak” addressing the output fiber at position (a, b) . We can then derive from (3) the diffraction efficiency η , as a function of the grating periods (N_x, N_y) :

$$\eta(N_x, N_y) = |C_{100}|^2 = \frac{4F^2}{\pi^2} \text{sinc}^2\left(\frac{\sqrt{F}}{N_x}\right) \text{sinc}^2\left(\frac{\sqrt{F}}{N_y}\right), \quad (4)$$

where we have considered a balanced grating ($\alpha=0.5$) for simplicity. The upper limit in η is obtained when N_x, N_y

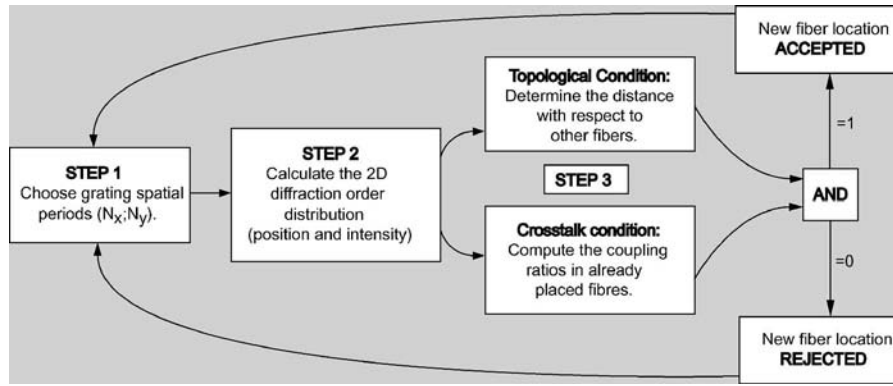


Fig. 5 Fiber core placement algorithm principle.

$\rightarrow \infty$ and $F \rightarrow 1$, yielding $\eta_{\max} = 4 / \pi^2 = 0.41$. Figure 3 shows that diffraction efficiency (or steering efficiency) is relatively constant for grating period values $N_x \geq 4$ and decrease significantly for smaller pixel per period number. Expression (4) being symmetric with respect to N_y , we shall restrict the grating period search space to $N_x \geq 4$ and $N_y \geq 4$, which will ensure that $\eta(N_x, N_y) \geq 0.3$.

The steering model could be further refined by considering deviations in the FLC cell parameters with respect to their optimal value, e.g., cell thickness, birefringence, and tilt angle. However, such variations will not affect the crosstalk evaluation and hence the basic steering model will be kept for the remainder of the discussion. Conversely, the limited size of the SLM will modify the output plane irradiance distribution, and the correction will be included in the fiber-array design algorithm presented in the next sec-

tion. The final step of the modeling will consist of calculating the coupling ratios between the input replicated modes and the output fibers. This point will be addressed in the next section.

2.3 Crosstalk Model

The input fiber mode replica as given by (3) will potentially generate crosstalk at the output plane. The description of the crosstalk events strongly depends on the output fiber placement process, which will be detailed in the next section. For the moment, we suppose that N_f fibers have been placed, each corresponding to a position (a_j, b_j) with $1 \leq j \leq N_f$, with an addressing grating described by an (N_x^j, N_y^j) pair. The question then is to know if a new grating with (N_x^{j+1}, N_y^{j+1}) pixels per period is acceptable taking into

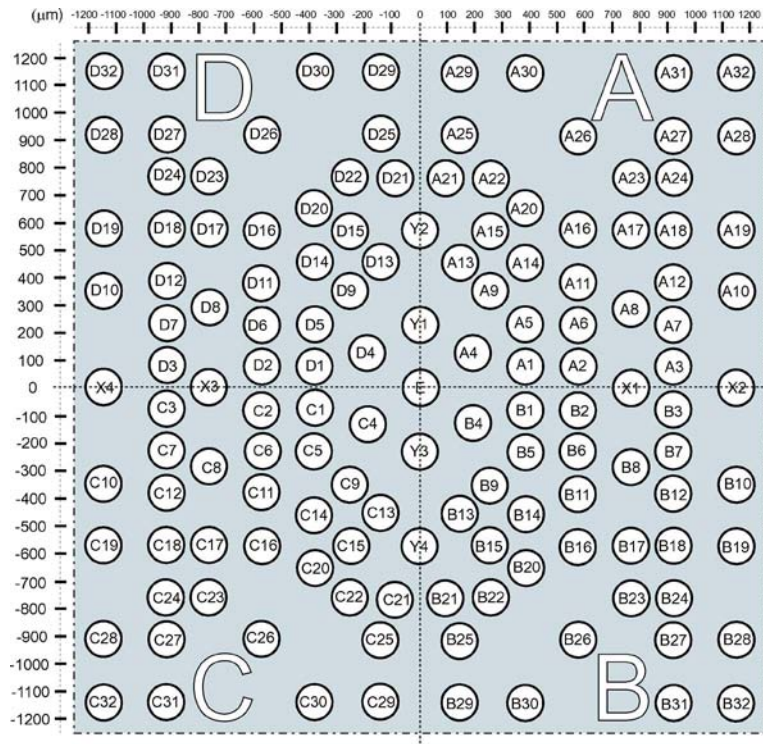


Fig. 6 Fiber array layout with 141 SM fibers placed within a 1.2×1.2 -mm square.

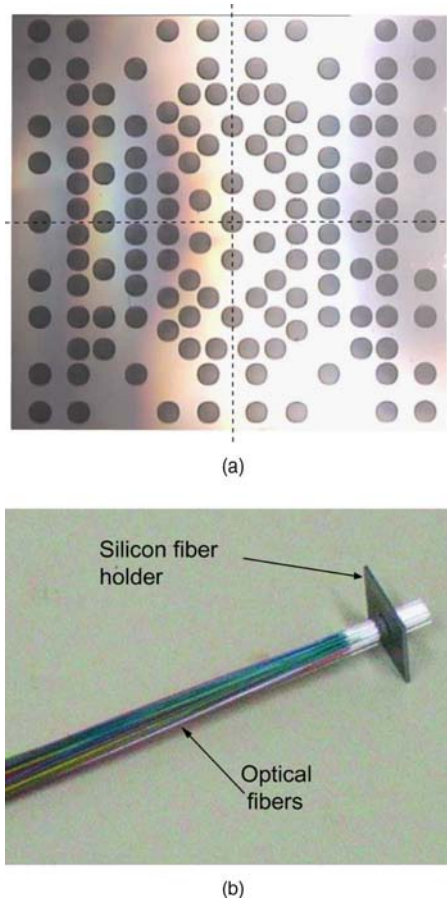


Fig. 7 (a) Top view of the bare silicon fiber holder with etched holes. (b) Side view after the fiber threading step.

account the fiber positions already set. Using its main (1,0,0)th order, this grating will address a fiber position located at the output coordinates $a_{j+1} = \sigma/pN_x^{j+1}$ and $b_{j+1} = \sigma/N_y^{j+1}$. Hence, two types of crosstalk conditions can be considered. First, the crosstalk between the higher orders corresponding to previously placed fibers and the virtually present tested fiber (referred to as *past* or P-crosstalk), and, second, the crosstalk between higher orders of the present (N_x^{j+1}, N_y^{j+1}) grating and the set of previously placed N_f fibers (referred to as *future* or F-crosstalk).

Crosstalk evaluation is based on the calculation of the optical intensity coupling of the incident Gaussian beams in the closest output fibers. We shall suppose that the optical setup is correctly aligned, with no focusing offset and tilt angle between the incident and output modes. The two waists (incoming beam and output fiber) will also be supposed to be equal, as the fibers are located in the same array. Under these assumptions, crosstalk evaluation will depend only on the distance Δr between a given incident input mode replica position P_{lmn}^k [corresponding to a previously calculated k grating, as given by (3)] and the present tested output fiber position (a_{j+1}, b_{j+1}) . The intensity coupling ratio between the incident mode and the fiber will be given by

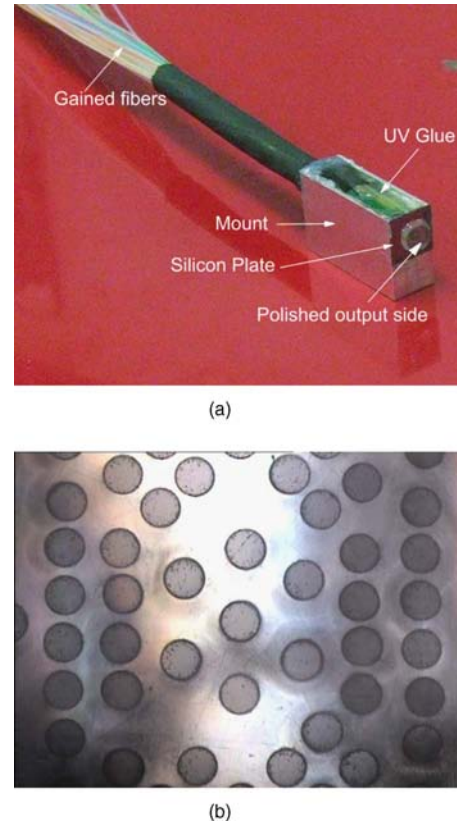


Fig. 8 (a) Fiber-array packaging view. (b) Exit side of the fiber array after the polishing stage (64 fibers have been threaded).

$$I_{\text{coupl}}(\Delta r) = |C_{nlm}^k|^2 \exp\left(-\frac{\Delta r^2}{\omega_0^2}\right), \quad (5)$$

where ω_0 is the waist radius of both the incident Gaussian beam and the output fiber. The resulting power isolation value (normalized with respect to the diffraction efficiency) will be given by the relation

$$\begin{aligned} X(\text{dB}) &= 10 \log_{10}\left(\frac{I_{\text{coupl}}}{|C_{100}^k|}\right) \\ &\approx -4.3\left(\frac{\Delta r}{\omega_0}\right)^2 + 20 \log_{10}\left(\frac{|C_{nlm}^k|}{|C_{100}^k|}\right). \end{aligned} \quad (6)$$

In order to process the crosstalk issue in an efficient manner in the fiber-positioning algorithm, one approach is to define *forbidden crosstalk areas* surrounding higher-orders positions so that future fibers cannot be placed if the port isolation is worse than a given reference value X_0 .

As an example, we consider the higher diffraction order shown in Fig. 4 and located at position P_{lmn}^k . Using Eq. (6), a radius $\Delta r(X_0)$ is calculated so that an isolation value better than X_0 is obtained from (6) if the output fiber is placed outside a disk of center P_{lmn}^k and radius $\Delta r(X_0)$. An additional safety radius margin corresponding to a fiber diameter d is added to compensate for possible fiber placement errors occurring during the fabrication process. This finally means that no optical fiber core center will be allowed in a disk of center P_{lmn}^k and radius $R = \Delta r(X_0) + d$.

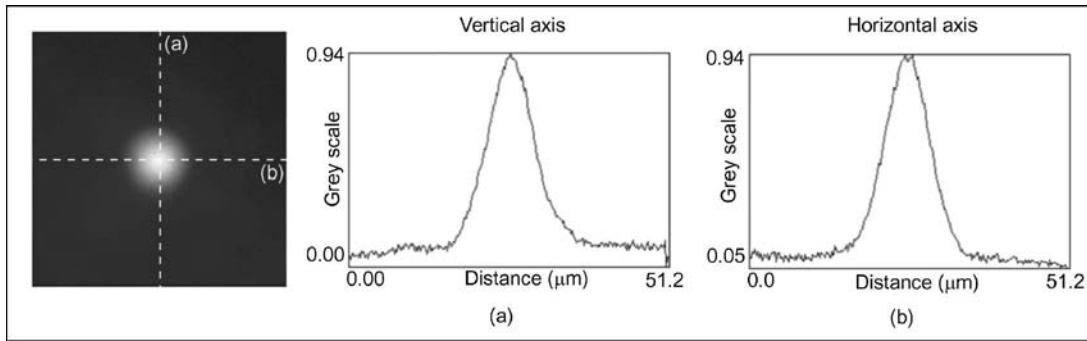


Fig. 9 Result of polished output fiber beam shape with Gaussian profile measured with near-field experimental setup.

2.4 Fibre Array Design Algorithm

Principle

Considering the beam-steering model described so far, the next step will consist of designing a fiber-array topology meeting the two major constraints pursued for the holographic switch i.e., (1) high-capacity and (2) low crosstalk levels. We propose an iterative procedure depicted in Fig. 5, for which the basic idea consists of sweeping the grating period space. For each (N_x, N_y) value, the placement of a fiber at the addressed position (i.e., $[1, 0, 0]$ th, deflected output peak location) will be validated or not, depending on the following three conditions:

1. *Diffraction efficiency constraint:* The first step of the fiber placement process is to select an (N_x, N_y) pair greater than a specified value ($N_x, y > 4$) corresponding to high steering efficiency in the first diffracted order (see Fig. 3).
2. *Minimal distance between fibers:* The fiber placement density is limited by the minimum spacing δ between two adjacent fibers. Considering a standard SMF fibers with a $125\text{-}\mu\text{m}$ cladding diameter, we will choose $\delta = 130\text{ }\mu\text{m}$. Using thinned cladding optical fibers (down to $40\text{ }\mu\text{m}$) is technically feasible but will not be considered here.
3. *Crosstalk condition:* The position and intensity of all the diffraction orders in the output plane are calculated using (3). The power isolation of each k input mode replica in the present (N_x, N_y) output fiber is calculated and compared to a reference threshold ($X_0 = 40\text{ dB}$ is the standard value). Equation (6) of the

crosstalk forbidden zone is derived and transformed into an equation in N_x and N_y to determine the grating period that will be rejected.

At last, if all criteria are respected, the new position corresponding to the (N_x, N_y) pair is accepted. If not, the position is rejected.

2.4.1 Capacity estimation

The fiber-addressing capacity intuitively depends on both the fiber core diameter d and the size of the addressed space in the output plane per dimension, given by $\Omega = \lambda f / p$ (p is the pixel pitch). The inversely proportional relationship between the number of pixels per period N_x and the output position a reached by the first order ($a = \sigma / N_x$) generates densely populated areas at the center of the addressing zone (for large N_x values) and sparsely populated areas away from the center (smaller N_x values). Thus, an estimate N of the holographic switch capacity per dimension can be given¹¹ by

$$N = 2 \left(\sqrt{\frac{\Omega}{d}} - 1 \right). \tag{7}$$

For the standard parameter values as used in Ref. 7 ($p = 13\text{ }\mu\text{m}$, $f = 40.5\text{ mm}$, $d = 125\text{ }\mu\text{m}$, and $\lambda = 1.55\text{ }\mu\text{m}$), one obtains a 2D capacity estimate of $N^2 = 110$ fibers. It is expected, however, that this value will be exceeded by the results obtained with the *truly 2D* geometrical search performed by the iterative algorithm described above.

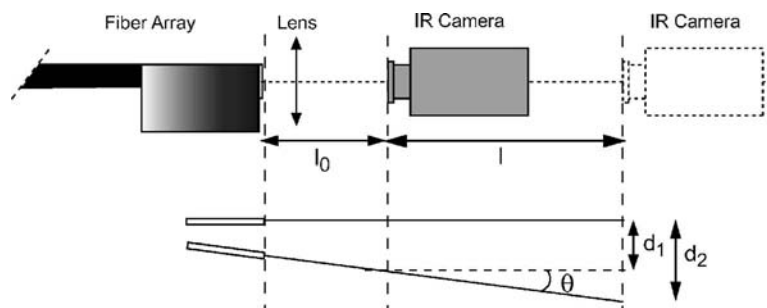


Fig. 10 Output beam angular test setup.

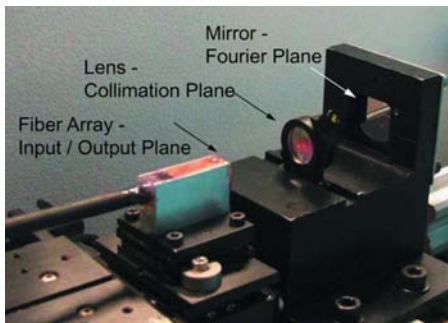


Fig. 11 Fiber-to-fiber coupling loss measurement setup.

2.5 Results

The algorithm shown in Fig. 5 is implemented using a computer-controlled procedure. The algorithm parameter values are intrinsically linked to such experimental conditions as SLM physical properties, optical setup dimensions, and fiber array technology. Thus, the fiber placement process will generate a non-unique solution, depicted in Fig. 6. The base pattern (A-zone) contains 32 fibers configured on an irregular lattice. It is replicated by a vertical axial symmetry to form the D-zone. Point symmetries with respect to the central fiber (denoted by “E”) provide the C- and B-zone, respectively. Nine other fibers are placed along the x - and y -axes of the output plane. This finally gives a total capacity of 141 fibers located in a $1.2\text{-mm} \times 1.2\text{-mm}$ square, this topology meets the previously defined crosstalk requirements. This configuration permits us to exploit the symmetrical position of diffraction orders generated by binary phase gratings. This property can be useful to implement a 1+1 *bridging function* in the switching device,⁷ providing natural optical protection of the WDM network layer.

The layout shown in Fig. 6 will be used as a reference pattern to fabricate 2D matrices, from low capacities (<10 ports) to several tens of output fibers.

3 Fiber-Array Fabrication

3.1 2D Fiber Holder Etching

The first step in the fiber-array manufacturing process is the choice of a 2D fiber holding technology. In this context, a well-known technology consists of superimposing 1D V-grooves,¹² which enables the fabrication of fiber arrays in various materials with a high positioning accuracy. As an alternative solution, a fiber-array fabrication process in which the fibers are embedded in adjacent ceramic ferrules arranged in a honeycomb topology has been proposed.¹³ The device was equipped with individual micro-optics at the end face of the fibers in order to enlarge the mode diameter and thus release the alignment constraints related to optical free space interconnections. A third technology option is based on micro-holes etching through a silicon plate. This mechanical holding system is used to minimize the fiber location and pointing errors, provided that the hole depth is long enough to guide and maintain the fiber in the reference position. A reasonable value for the drilled holder thickness is four times the fiber cladding diameter, i.e., about $500\ \mu\text{m}$ for standard SMF fibers. This method also

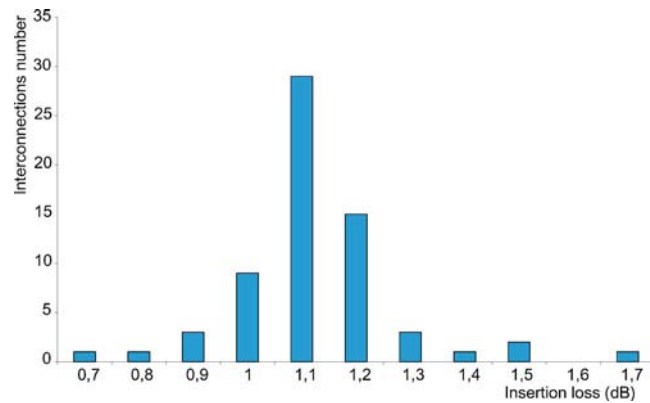


Fig. 12 Fiber-to-fiber coupling loss results for a 32-output fiber array.

provides high flexibility and accuracy in the fiber placement scheme. Due to the fiber density required (as shown in Fig. 6), this is the preferred option here. The basis for our fiber-array integration process is a silicon plate holder ($530\text{-}\mu\text{m}$ thickness), whose thermal expansion coefficient is known to be very low, containing precisely etched holes placed as in Fig. 6. This micro-drilled plate is fabricated using a complex deep reactive ion etching (DRIE) process, providing holes with conical shapes on one side for an easier fiber insertion. The measured entrance and exit hole diameter specifications are $130 \pm 2.0\ \mu\text{m}$ and $126 \pm 1.0\ \mu\text{m}$, respectively. Although controlling the etched holes profiles with such an accuracy is a complex task, several batches of components were successfully etched and cleaned [Fig. 7(a)]. The fibers are then precisely inserted in the desired etched holes using a threading process controlled with a binocular microscope. The fibers are then fixed to the silicon plate with an Epotecny NOA 61 UV glue dedicated to the integration of opto-mechanical systems. This operation is achieved in a vacuum chamber in order to fill the gap between the fiber claddings and the hole walls. Each fiber is then reinforced with a polymer sheath whose diameter d_s depends on the final fiber-array capacity (typically, $d_s=900\ \mu\text{m}$ for capacity ≤ 32 fibers and $d_s=600\ \mu\text{m}$ for capacity ≥ 32 fibers).

Four types of fiber arrays with different capacities of 16, 32, 64, or 128 fibers are manufactured using the fiber holder shown in Fig. 7(a).

3.2 Fiber-Matrix Packaging

In a second step, a steel mount is specifically machined to the silicon plate geometry, which is precisely fixed to the output face of the steel mount using Epotecny UVS-91 UV glue. This operation will determine the final output fiber-plane direction. As illustrated in Fig. 8(a) the optical fibers are then collected with a heat-retractable sheath that is interlocked with the steel mount using liquid NOA 61 UV glue, so that the optical fiber array remains mechanically reinforced during the next critical polishing step.

The polishing phase is performed with a custom procedure to maintain flatness and optical quality across the array. The fiber-to-fiber coupling ratio will directly depend upon the quality of the polishing step. The difficulty here is to impose the right fiber end-face orientations (i.e., right

angle with respect to the fiber axes) by polishing all the fibers simultaneously and in the same conditions. To this aim, a custom-designed stainless steel polishing clamp is used to fix the fiber-array mount during the whole polishing operation. The fiber array is polished using a horizontal rotating platen with an abrasive surface whose granularity is gradually reduced from $50\ \mu\text{m}$ to $0.3\ \mu\text{m}$. The material residue draining process is optimized in order to avoid weakening of the output fiber surface. This point is periodically controlled during the process by observing the output surface through a binocular microscope. Figure 8(b) shows a typical image of an acceptable end-face quality for the fiber array after the polishing stage (64 fibers have been threaded).

4 Experimental Test Results

The purpose of the fiber-array characterization procedure is twofold. First, we will evaluate the optical quality of the fiber-array end face in order to validate the device fabrication process; second, the fiber matrix is tested in an optical fiber-to-fiber interconnection setup to evaluate the fiber-to-fiber insertion loss.

4.1 Output Fiber-Plane Test

4.1.1 Near-field tests

The near-field experimental setup is used to measure the output fiber-beam shape. An infrared camera* is placed on the fiber-array optical axis, and optical beam profile measurement software is used to display the optical beam profile in both the vertical and horizontal axes. Figure 9 shows the measured intensity profile in two figure orthogonal directions, featuring the ideal case of a single-mode Gaussian beam emerging from a fiber end face with good optical quality.

4.1.2 Output beam angular tests

The same experimental setup principle is used to test the output fiber-surface orientation. The infrared camera is placed here at two different positions of the optical axis in order to compare the positions of the Gaussian beam center between a reference fiber and the tested fiber (cf. Fig. 10). The angular deviation $\delta\theta$ of the beam emerging from the tested fiber is determined by the equation

$$\tan(\delta\theta) = \frac{(d_2 - d_1)}{l}, \quad (8)$$

where d_1 and d_2 are the two distances between the incident Gaussian beam centers from the two fibers measured at two positions separated by a distance l . The angular deviation can then be used to estimate the coupling efficiency variation between the input and output fibers (the latter is supposed to be perfectly aligned on-axis):

*Type IR-Vidicon camera; Model C2400-03; sensitive surface 12.9(H)-9.5(V); horizontal lines: 575 (CCIR).

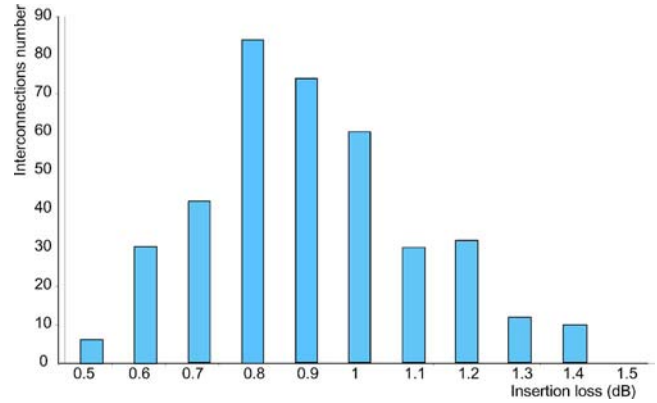


Fig. 13 Fiber-to-fiber coupling loss results for a 64-output fiber array.

$$I_{\text{coupled}}(\delta\theta) = \exp\left[-\left(\frac{\pi\omega_0}{\lambda}\right)^2 \cdot \delta\theta^2\right]. \quad (9)$$

The angular tests performed on a statistical set of 20 fibers have shown a negligible angular deviation, as they produce an average coupling efficiency variation lower than 0.1 dB.

4.2 Fiber-to-Fiber Coupling Loss Measurement

An important step to assess the performance of the fiber matrix is to test the fiber-to-fiber coupling loss. This is achieved by replacing the SLM of Fig. 1 with a mirror optimized for near-infrared operation. The lens used is an achromat doublet (*Melles-Griot*) composed of two different glasses (BaLKN3 and SF15[†]). The fiber array is placed on 6-axis micro-positioning system in the reflective $4f$ setup shown in Fig. 11.

The optical micro-bench is first aligned using a visible He-Ne laser light that is injected in the input fiber and coupled to an output fiber by moving the fiber array. The fiber-to-fiber coupling loss is then measured using infrared light at $1.55\text{-}\mu\text{m}$ wavelength. The operation is repeated for a large number of input/output fiber pairs. Test results are proposed in Figs. 12 and 13 for 32 and 64 output fiber arrays, respectively, with a collection of more than 100 measurements between randomly chosen fiber pairs. The mean measured fiber-to-fiber losses are, respectively, 1.1 dB and 0.9 dB, with 0.3-dB standard deviation in both cases. These values are encouraging as the fiber end faces are not antireflection-coated.

The final test consists of measuring the polarization-dependent coupling loss variation. It is performed on a set of randomly chosen fibers (the fiber array used is the component containing 64 fibers) by inserting a polarization controller between the emitted fiber and the addressed fiber. The fiber-to-fiber coupling efficiency variations between the maximum and minimum values for different polarization states are given in Table 1 and reveal a negligible polarization-dependent loss for the tested fiber array.

[†]Model #01LAL011.

Table 1 Polarization-dependent loss measurement (64-fiber array).

Fiber F_i	PDL $\lambda/4$	PDL $\lambda/4+\lambda/2$
F_1	0.027	0.0662
F_2	0.030	0.0670
F_3	0.049	0.0850
F_4	0.036	0.0760
F_5	0.032	0.0700
Referential measure	0.020	0.0350

5 Conclusions

We have reported the design of a 2D irregular fiber array dedicated to fiber-to-fiber holographic switching using a binary-phase steering device. We have proposed a specific high-density output fiber placement algorithm based on coupling efficiency maximization and crosstalk minimization.

Fiber-array prototype fabrication steps have been described, and two devices have been tested. The best component exhibits a 64-output fiber capacity with less than 1 dB fiber-to-fiber insertion loss and negligible polarization-dependent loss.

The next step is to integrate the fabricated fiber array in a dynamic holographical fiber-to-fiber switching setup. This operation as well as the performance of the resulting device are presented in a submitted publication.¹⁴

Acknowledgments

The authors would like to thank the *Optogone/Memscap* and *PHS MEMS* companies for funding and performing the wafer-etching process, and Michel Gadonna (ENST Bretagne) for valuable discussions concerning the near-field characterization setup.

References

- J. Strand and A. Chiu, "Realizing the advantages of optical reconfigurability and restoration with integrated optical cross-connects," *J. Lightwave Technol.* **21**(11), 2871–2882 (2003).
- P. A. Bonenfant and M. L. Jones, "OFC 2003 workshop on wavelength selective switching based optical networks," *J. Lightwave Technol.* **22**, 305–309 (2004).
- T. Goh, M. Ishii, T. Mizuno, S. Kamei, I. Ogawa, H. Hirota, Y. Tamura, M. Kobayashi, M. Yanagisawa, S. Sohma, and A. Kaneko, "Four-degree hub switch module using multi-chip planar lightwave circuit integration technology for transparent road ring interconnection," in *Optical Fiber Communication Conference Technical Digest*, pp. OTuF3.1–OTuF3.3 (2006).
- D. M. Marom, D. T. Neilson, D. S. Greywall, C.-S. Pai, N. R. Basavanthally, V. A. Aksyuk, D. O. López, F. Pardo, M. E. Simon, Y. Low, P. Kolodner, and C. A. Bolle, "Wavelength-selective $1 \times k$ switches using free-space optics and mems micromirrors: Theory, design, and implementation," *J. Lightwave Technol.* **23**(4), 1620–1630 (2005).
- G. Baxter, S. Frisken, D. Abakoumov, H. Zhou, I. Clarke, A. Bartos, and S. Poole, "Highly programmable wavelength selective switch based on liquid crystal on silicon switching elements," in *Optical Fiber Communication Conference Technical Digest*, pp. OTuF2.1–OTuF2.3 (2006).
- W. Crossland, I. G. Manolis, M. M. Redmond, K. L. Tan, T. D. Wilkinson, M. J. Holmes, T. R. Parker, H. H. Chu, J. Croucher, V. A. Handerek, S. T. Warr, B. Robertson, I. G. Bonas, R. Franklin, C. Stace, H. J. White, R. A. Woolley, and G. Henshall, "Holographic optical switching: The 'roses' demonstrator," *J. Lightwave Technol.* **18**(1), 1845–1854 (2000).
- B. Fracasso, J. L. de Bougrenet de la Tocnaye, M. Razzak, and C. Uche, "Design and performance of a versatile holographic liquid-crystal wavelength-selective optical switch," *J. Lightwave Technol.* **21**(10), 2405–2411 (2003).
- K. Heggarty, B. Fracasso, C. Letort, J.-L. de Bougrenet de la Tocnaye, M. Birch, and D. Krüerke, "Silicon backplane ferroelectric liquid crystal spatial light modulator for uses within an optical telecommunications environment," *Ferroelectrics* **312**, 39–55 (2004).
- K. Tan, S. T. Warr, I. G. Manolis, T. D. Wilkinson, M. M. Redmond, W. A. Crossland, R. J. Mears, and B. Robertson, "Dynamic holography for optical interconnections. II Routing holograms with predictable location and intensity of each diffraction order," *J. Opt. Soc. Am. A* **18**(1), 205–214 (2001).
- C. Letort, "Modélisation, implantation et caractérisation de fonctions de routage tri-dimensionnel de canaux optiques pour les réseaux WDM," in PhD dissertation, Université de Rennes 1, pp. 149–154 (2007).
- C. Letort, M. Razzak, B. Fracasso, and K. Heggarty, "Dynamic spectral response of a liquid crystal based optical channel selector," in *PS 2003—Photonics in Switching Conference*, pp. 259–261 (2003).
- Corning, <http://www.corning.com/docs/specialtymaterials/pisheets/pi107.pdf>.
- P. Chanclou, M. Thual, J. Lostec, P. Auvray, J. Caulet, G. Joulie, A. Poudoulec, and B. Clavel, "Highly efficient collective coupling between laser diode arrays," *Proc. SPIE* **3289**, 97–102 (1998).
- C. Letort, B. Fracasso, and K. Heggarty, "Design and test of a 1×64 and crosstalk-free 2D-holographic liquid-crystal optical switch," *J. Lightwave Technol.* submitted for publication.

Cedric Letort was a PhD student from GET/Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications de Bretagne (Brest, France). He received an engineering degree from Magistère Matériaux de Rennes I (France) and a PhD degree in Signal Treatment & Telecommunications from Université de Rennes I and Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications de Bretagne in 2007. He is currently involved in engineering projects on optical instrumentation for satellite application at CNES (Toulouse, France).

Bruno Vinouze has been an associate professor at TELECOM Bretagne in the Optical Department since 2001. He graduated from INSA in Physics in 1996. In a France Telecom Research Center he has over 20 years of experience in the liquid crystal domain in LC displays (2S and 3S TFTLCD) and specific telecom LC devices (switches, VOA, MUX, tunable filters). Between 1999 and 2001 he has been involved in R&D for different telecom start-up. He lectures in the telecom physic layers, especially on optical components. He is the co-author of more than 46 publications and has 26 patents.

Bruno Fracasso is an associate professor at GET/Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications de Bretagne (Brest, France). He received an engineering degree from Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications de Bretagne in 1989 and a PhD degree in Electrical Engineering from Université de Haute Alsace, Mulhouse (France) in 1993. He is currently involved in research projects on optical switching for and routing within fiber networks, combining device modelling, simulation and technological integration.