



HAL
open science

Contribution à l'étude, la fabrication et l'application des éléments optiques diffractifs, fixes et reconfigurables.

Kevin Heggarty

► **To cite this version:**

Kevin Heggarty. Contribution à l'étude, la fabrication et l'application des éléments optiques diffractifs, fixes et reconfigurables.. Optique / photonique. IMT Atlantique; UBS, 2010. tel-02166794

HAL Id: tel-02166794

<https://hal.science/tel-02166794>

Submitted on 27 Jun 2019

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.



Rapport de synthèse

présenté par

Kevin Heggarty

pour l'obtention de

l'Habilitation à Diriger des Recherches

**Contribution à l'étude, la fabrication et
l'application des éléments optiques
diffractifs, fixes et reconfigurables.**

Soutenu le 14 septembre 2010 devant le jury composé de:

Trevor Hall
Pierre Ambs
Pierre Pellat-Finet
Gilles Keryer
Jean-Louis de Bougrenet de la Tocnaye

Président
Rapporteur
Rapporteur
Rapporteur
Examineur

HDR de Kevin Heggarty

Table des matières

1	Introduction.....	5
2	Résumé du Parcours Scientifique.....	7
3	Traitement optique de l'information.....	11
3.1	Introduction.....	11
3.2	Réseaux de Neurones.....	11
3.2.1	Implantation opto-electronic d'un réseau de neurones.....	12
3.2.2	Implantation optique d'un réseau de neurones.....	12
3.3	Reconnaissance de formes pour les applications dans le transport routier.....	14
4	Les modulateurs spatiaux de lumière et leur applications hors affichage.....	17
4.1	Introduction et définitions.....	17
4.2	Caractéristiques principales des MSL.....	18
4.3	Différentes technologies MSL.....	21
4.3.1	MSL à cristaux liquides.....	21
4.3.2	MSL à micro-miroirs MEMS.....	22
4.3.3	MSL à effet magnéto-optique.....	23
4.3.4	MSL à puits quantiques.....	24
4.3.5	MSL optiquement adressés.....	24
4.4	Projets et Contributions aux MSL et à leurs applications.....	24
4.4.1	Réseaux de neurones Hopfield et MSL Magnéto-Optique.....	24
4.4.2	Réseaux de neurones Kohonen et les modulateurs Ferroélectriques.....	25
4.4.3	Projet DRAWMAP – phototraçage massivement parallèle.....	25
4.4.4	Projet LASSAR – analyse de faisceau.....	26
4.4.5	Pincettes optiques.....	27
4.4.6	Commutation de communications optiques.....	29
4.4.7	Projet PRINT – phototraçage UV.....	30
4.5	Conclusions et futur développements.....	31
5	Optique Diffractive Synthétique.....	33
5.1	Introduction.....	33
5.2	Définitions et restrictions.....	33
5.3	Modélisation et calcul.....	34
5.3.1	Régimes de diffraction.....	34
5.3.2	Besoin de codage de EOD synthétiques.....	36
5.3.3	Les algorithmes de calcul de EOD synthétiques.....	38
5.4	Fabrication.....	41
5.4.1	Masquage photo-lithographique.....	42
5.4.2	Écriture Directe.....	44
5.4.3	Copie d'EOD par nano-embossage.....	48
5.5	Caractérisation.....	49
5.6	Applications.....	51
5.6.1	Mesure front d'onde.....	51
5.6.2	Interconnexion de fibres multi-cœurs	52
5.6.3	Holotetrix.....	53
5.7	Conclusion et perspectives.....	53
6	Conclusion et perspectives.....	57
7	Bibliographie.....	61

8 Liste des abréviations.....	68
.....	70
Annexe 1 - C.V. de Kevin Heggarty.....	71
Annexe 2 - Encadrement Doctoral.....	73
Annexe 3 - Projets de Recherche.....	75
Annexe 4 - Publications et Communications.....	77
Annexe 5 - Activités d'Enseignement.....	81
Annexe 6 - Sélection de publications scientifiques.....	83

1 Introduction

Il y a plusieurs manières de faire une synthèse de plus de vingt ans de travaux de recherche. Une présentation chronologique aurait probablement été le plus simple mais j'ai voulu essayer de rendre ce manuscrit un peu plus utile qu'un simple catalogue des activités d'une personne. J'ai donc choisi un découpage thématique. L'inconvénient de cette approche est qu'un bon nombre des activités et projets de recherche se trouvent forcément dans plusieurs thèmes, ce qui mène à quelques redites et parfois à une impression de morcellement. Le désir d'utilité a cependant été plus fort et c'est le découpage thématique qui a été retenu dans l'espoir que certaines parties du manuscrit pourraient intéresser et peut-être servir à quelqu'un d'autre que l'auteur.

Pour chaque thème j'ai essayé de faire une courte introduction sur les motivations de la recherche dans le domaine, sur l'historique des recherches et sur les avantages et les inconvénients des principales techniques utilisées. Le but n'est en aucun cas de faire un état de l'art car, pour chaque thème, il existe d'excellents articles de revue ou de livres qui font cela déjà, mieux et plus en détail qu'il n'est possible de faire ici (j'essaie d'indiquer et de recommander quelques uns de ces textes dans mes références). L'objectif des introductions est surtout de dessiner le contexte afin de permettre au lecteur de mieux situer notre travail et comprendre notre contribution.

Le premier thème, le traitement optique de l'information, n'est pas le sujet principal de mes activités de recherche, mais il était le premier, perdue en quelque sorte en tâche de fond et figure surtout parce qu'il m'a mené aux deux autres sujets qui à l'origine, n'étaient que des outils pour me permettre d'étudier le traitement optique de l'information mais qui sont ensuite devenus mes thèmes de recherche principaux.

En regardant rétrospectivement mes travaux de recherche pour préparer ce manuscrit, je me suis rendu compte que les modulateurs spatiaux de lumière (MSL) figurent dans presque tous les dispositifs expérimentaux que j'ai conçus et réalisés. J'ai eu la chance de les utiliser et de les développer sous pratiquement tous leurs aspects : technologies à micro-miroirs et à cristaux liquides, électriquement adressés et optiquement adressés, modulation d'amplitude, de phase et de polarisation, modulation binaire et continue, spectre visible, infra-rouge et ultra-violet, en imagerie et en diffraction ... Comme deuxième thème, traité au chapitre 4, j'ai donc choisi les modulateurs spatiaux de lumière.

Le dernier thème, les éléments optiques diffractifs (EOD), est probablement le plus complet car à travers mes différents travaux, projets et contrats de recherche j'ai été amené à aborder en détail la modélisation, le calcul, la fabrication, la caractérisation, l'application et jusqu'à la commercialisation de ces composants de plus en plus répandus.

Le lecteur remarquera rapidement que la plus grande partie de mes travaux de recherche sur ces thèmes s'est déroulée dans le cadre de projets et contrats de recherche que j'ai dirigés et des thèses que j'ai encadrées. Afin de ne pas interrompre le fil de la présentation scientifique et technique, les détails plus administratifs de mes projets et collaborations industriels et institutionnels (Européens et Régionaux) se trouvent dans les annexes, tout comme les détails administratifs des thèses encadrées. Il en va de même pour l'autre aspect important dans les activités d'un enseignant-chercheur : l'enseignement. C'est un aspect très important qu'il ne faut pas laisser de côté mais il me semble qu'il a peu sa place dans un manuscrit d'habilitation à diriger des *recherches*. Une synthèse de mes activités d'enseignement se trouve donc dans l'annexe 5.

Enfin, pour ne pas laisser complètement de côté la présentation chronologique qui peut aider à comprendre la cohérence, nous verrons maintenant dans le premier chapitre, une synthèse rapide de mon parcours professionnel.

2 Résumé du Parcours Scientifique

Après mes études au lycée en Grande Bretagne dans la spécialité scientifique (A levels), je n'ai pas intégré directement l'université. J'ai pris une année de césure pendant laquelle j'ai travaillé d'abord à l'université locale (York) en tant que stagiaire « codeur » où j'ai écrit des applications informatiques pour l'enseignement des sciences dans les lycées britanniques. Ensuite je suis parti travailler en France en tant que bénévole auprès des personnes handicapées mentales. Cette année m'a donc permis d'apprendre d'une part la programmation informatique et d'autre part l'utilisation de la langue française au travail.

Mes études universitaires ont débuté par un Bachelor of Arts (BA) en « Natural Sciences » (spécialisation Physique) à l'université de Cambridge en Grande Bretagne. J'ai poursuivi par un Master of Science (MSc) en Telecommunications et Systèmes d'Information à l'université d'Essex à Colchester en Grande Bretagne, attiré par les liens avec le centre de recherche de British Telecom (Martelsham Heath situé à quelques kilomètres) et la possibilité, encore relativement rare à l'époque, d'effectuer comme partie intégrante du cursus, un stage de recherche de 6 mois à l'ENST Paris. A l'issue de ce stage effectué au sein du groupe Optronique d'Alain Maruani, dans le département Images dirigé par Henri Maitre, j'ai réussi à obtenir une bourse de thèse de doctorat de la Communauté Européenne qui m'a permis de prolonger mon stage par un doctorat dans le même groupe.

Cette thèse sur une implantation opto-électronique d'un réseau de neurones formels m'a permis de me familiariser avec plusieurs techniques qui sont devenues progressivement mes spécialités scientifiques au cours de ma carrière: conception et montage de systèmes optiques complexes comportant de multiples éléments opto-électroniques et leur pilotage informatique, modélisation et simulation numérique de la diffraction, modélisation et fabrication par voie photolithographique d'éléments optiques diffractifs (EOD) calculés (souvent appelés Hologrammes Synthétisés par Ordinateur: HSO), caractérisation et utilisation des modulateurs spatiaux de lumière (MSL ou plus fréquemment SLM de l'anglais Spatial Light Modulator). Pendant ma thèse j'ai pu également exploiter mon goût pour les expériences et collaborations internationales au travers d'un séjour au Technion à Haifa en Israël où j'ai fabriqué mes premiers EOD en adaptant une machine de photoinscription directe par laser dédiée normalement à la préparation de circuits ASIC. Enfin, à Paris j'ai eu mes premières expériences de publication scientifique (1 publication et 3 conférences), de l'enseignement à travers de quelques cours et travaux pratiques et de l'encadrement de stagiaires.

A la fin de ma thèse en 1991 je suis parti au Tchad pendant un an tant que coopérant volontaire au Lycée Sacré Cœur de Ndjaména où j'étais professeur de mathématiques pour les classes de Terminal. De retour en France en 1992, mon ancien groupe à l'ENST Paris m'a proposé une position « post-doc » pour aider le thésard qui avait pris la suite de mes travaux à modifier mes programmes de calcul d'EOD afin de les adapter au masqueur à faisceau d'électrons du Centre Nationale d'Etudes en Télécommunications (CNET) de Bagneux. A la fin de ce projet j'ai intégré (position « post-doc ») le groupe optique de Jean-Louis de Bougrenet de l'ENST Bretagne à Brest pour travailler sur une implantation opto-électronique d'un réseau de neurones de type Kohonen à base de MSLs à cristaux liquides.

Par la suite, en 1995 l'ENST Bretagne m'a proposé une position d'Ingénieur de Recherche responsable de l'installation, la mise au point, le fonctionnement et la valorisation d'une salle blanche dédiée à la fabrication d'éléments optiques diffractifs. Cela m'a permis de perfectionner mes logiciels de modélisation et de calcul par algorithmes d'optimisation sous contraintes d'EOD et de nouer des contacts académiques et industriels en particulier avec l'entreprise allemande Mivatec, fabricant de phototraceurs parallèles à base de MSL.

En 1997, lors du transfert des écoles de télécommunication de France Telecom vers la nouvelle structure GET (Groupe des Ecoles de Télécommunication) j'ai bénéficié d'un des premiers postes GET car j'ai été recruté sur une position permanente de Maître de Conférence à l'ENST Bretagne. Bien que participant déjà ponctuellement aux enseignements à l'Ecole (surtout à travers des projets d'élève, des stages, des cours en DEA et en spécialisation de 3e année), c'est à depuis cette date que je participe pleinement aux enseignements de l'école, en particulier au travers de la création en 2000 et la gestion pendant sept ans d'un mastère spécialisé bilingue (anglais/français) en réseaux de télécommunications et datacommunications optiques. J'ai renforcé en même temps mes activités de recherche, encadrant une première étudiante en thèse, Marwa El-Bouz, sur le développement des algorithmes de calcul d'EOD. Cette thèse nous a permis, au travers de deux publications, d'expliquer le lien entre les algorithmes dites de « diffusion d'erreur » et les algorithmes itératifs. Afin de poursuivre les aspects expérimentaux j'ai simultanément monté et obtenu un premier projet Européen « DRAWMAP ». de type CRAFT pour lequel j'ai été responsable technique et administratif (« prime »). Ce projet comportait 6 partenaires (France, Allemagne, RU, Suède, Autriche) dont Mivatec et concernait la conception et mise au point de trois prototypes de phototraceurs massivement parallèles tous basés sur le principe de l'imagerie d'un MSL sur un support photosensible. Il a permis à Mivatec d'augmenter la performance de ses phototraceurs commerciaux et a doté le département optique de l'ENST Bretagne d'un phototraceur très haute performance spécifiquement adapté à la fabrication rapide d'EOD.

L'expérience obtenue avec les MSL et optiques diffractives nous a permis d'intégrer un autre projet Européen, LASSAR, sur la caractérisation de micro-structures (dont des EOD) à partir de la diffraction de fronts d'ondes connus, reconfigurables, générés par MSL. C'est dans le cadre de ce projet que j'ai encadré mon deuxième thésard, Alexandre Mazine.

En 2002 j'ai pu bénéficier d'un séjour sabbatique à l'université d'Edimbourg en Ecosse, travaillant deux jours par semaine chez CRLOpto, un fabricant de MSL hautes performances à base de cristaux liquides ferroélectriques sur circuit silicium (« silicon backplane »), partenaire à la fois de l'ENST Bretagne et de l'université d'Edimbourg. Cette expérience très enrichissante m'a permis de découvrir, du point de vue d'un enseignant chercheur, l'organisation de l'enseignement et de la recherche dans les universités britanniques, de nouer de nombreux contacts en Grande Bretagne et surtout d'acquérir une expérience forte de la vie en entreprise. Mon travail était centré sur l'adaptation des MSL de CRLOpto aux applications spécifiques de l'université d'Edimbourg et de l'ENST Bretagne. A l'université nous avons utilisé un MSL CRLOpto dans un système de pincettes optiques (« optical tweezers ») multi-faisceau pour des applications biologiques. Pour l'ENST Bretagne, en lien avec l'entreprise Optogone, nous avons optimisé un MSL pour une opération en tant que réseau de diffraction reconfigurable (modulation de phase à la longueur d'onde de 1550nm) dans un système de commutation de communications optiques. Ces deux modifications et applications ont donné lieu à des publications et présentations à des conférences internationales.

De retour à Brest j'ai repris mes activités d'enseignement, les développant vers l'international au travers de notre participation dans deux Réseau d'Excellence Européens (« Network of Excellence »). Dans le premier, ePhotonONe, j'ai organisé l'école d'été 2007 à Brest et dans le deuxième, BONE, je suis actuellement co-responsable des activités d'enseignement (« workpackage leader »).

Mes activités de recherche sur l'optique diffractive se sont approfondies via le projet Européen NewTon (thèse de Nolwenn Dissaux) pour lequel j'étais responsable d'un part de la caractérisation de structures et de composants cristaux photoniques et de l'autre part la combinaison des techniques de photoinscription parallèle par MSL et de la polymérisation à deux photons à l'aide d'impulsions ultracourtes. Nous avons également amélioré notre capacité de fabrication de micro-optiques diffractives grâce à de ce projet et le projet Région Bretagne PRINT (thèses de Mélanie Kessels et de Charbel Nassour) centré sur la conception, le montage et l'application d'un nouveau phototraceur massivement parallèle fonctionnant cette fois-ci dans l'UV et à base d'un MSL à micromiroirs. Ce nouveau phototraceur permet ainsi de travailler avec une plus grande variété de matériaux photosensibles et de réaliser des structures de résolution submicronique. La maîtrise de l'utilisation des MSL dans les phototraceurs massivement parallèles et la reconnaissance internationale résultant de nos publications sur le sujet ont fait que nous avons été contactés à deux reprises par des PME (Allemandes). Ces contacts se sont soldés par les projet industriels OPTILSYS et NANOPLOT.

Devant les demandes répétées de conception et de réalisation de composants diffractifs de la part de laboratoires et entreprises, j'ai créé avec Jean-Louis de Bougrenet (chef du département optique de Telecom Bretagne) et Denis Battarel (ingénieur optique issu du monde industriel) l'entreprise « start-up » Holotetrix. Cette jeune pousse, présente dans l'incubateur de Telecom Bretagne depuis 2007, conçoit et commercialise sous licence de transfert de technologie Telecom Bretagne, des prototypes et petites séries d'EOD. Le lien entre Holotetrix et le département d'optique de Telecom Bretagne reste très fort et s'est poursuivi en particulier par les projets NANOPLOT, OSEO-HOLOTRITRIX et HOLOLAS (Région Bretagne) avec un volet actuel important sur les techniques de copie par embossage (« nanoimprint ») d'EOD (thèse Aurélie Yong).

Enfin, en parallèle de ces activités de recherche principales j'ai maintenu une activité plus réduite dans le domaine du traitement optique de l'information appliqué à la reconnaissance des formes. Cette activité se poursuit via la thèse CIFRE de Jérôme Ninot sur la reconnaissance par voie optique et informatique (traitement numérique des images) de la signalisation routière horizontale (lignes blanches) et verticale (panneaux) pour les applications automobiles.

3 Traitement optique de l'information

3.1 Introduction

Comme nous verrons dans la suite de ce document, le traitement optique de l'information en soit n'est pas le thème principal de mes activités de recherche. Cependant il formait le sujet de mes premières activités de recherche pendant ma thèse et mes « Post-doc », c'est à travers lui que j'ai rencontré et commencé à m'intéresser aux éléments optiques diffractifs (EOD) synthétiques et aux modulateurs spatiaux de lumière (MSL) qui sont devenus mes principaux thèmes de recherche et j'ai, jusqu'à ce jour, toujours gardé une activité parallèle dans ce domaine. Puisque c'est un sujet secondaire, le traitement ici sera court et ne concernera que les implantations opto-électroniques et optiques des réseaux de neurones, sujets de ma thèse et « Post-doc », et la reconnaissance par voie optique et électronique de la signalisation routière, sujet de la thèse CIFRE de Jérôme Ninot que je supervise actuellement.

Les atouts principaux de l'optique dans le traitement de l'information sont son parallélisme naturel - on traite les images (données 2D), propageant l'information dans l'espace libre (3D) là où l'électronique traite naturellement des vecteurs (données 1D) car la propagation est confinée à des pistes conductrices sur une surface 2D (substrat silicium) – et sa très grande bande passante potentielle due à sa fréquence porteuse très élevée. Ces atouts de principe ont mené à un engouement pour les recherches dans le traitement optique de l'information et « l'ordinateur optique » (« Optical Computing ») pendant les années 1980-1990 (voir [1] pour une synthèse et [2] pour une revue historique du domaine). En même temps les chercheurs ont regardé des architectures de calculateurs différents, plus aptes à tirer partie des atouts de l'optique – les architectures à « réseaux de neurones » en sont un exemple important.

3.2 Réseaux de Neurones

Avec la large diffusion des ordinateurs dans les années 1980-1990, il est devenu clair que, malgré leur vitesse et leur puissance de calcul toujours croissantes, les ordinateurs classiques étaient mal adaptés à la résolution de certains types de problèmes. Ce sont, typiquement, des problèmes qui se prêtent mal à une mise en algorithme, par exemple, la reconnaissance d'image et de la parole, le pilotage de robots, certains problèmes d'optimisation, etc. Le fait que le cerveau humain accomplisse nombre de ces tâches avec une aisance remarquable a encouragé les scientifiques et ingénieurs à se baser sur les modèles du système nerveux pour la réalisation de nouveaux types d'ordinateur, susceptibles de résoudre ces problèmes. Cet intérêt s'est vu renforcé par la nature intrinsèquement parallèle des modèles neuronaux. On a vu alors les modèles neuronaux utilisés également comme support d'architecture pour des machines massivement parallèles, qui promettaient des puissances de calcul très élevées.

Un réseau de neurones artificiels est modélisé [3] par un grand nombre de processeurs élémentaires (neurones) simples, fortement connectés. Typiquement chaque neurone somme les signaux d'entrée provenant des autres neurones, pondérés par le poids des connections (poids synaptiques) puis applique une fonction non-linéaire à cette somme pour déterminer sa propre activité. Plusieurs arrangements des neurones en réseau sont possibles (figure 1) comme les réseaux à état d'équilibre (ex. Hopfield [4]) ou en couches (ex. Kohonen [5]). L'opération d'un réseau de neurones se fait habituellement en deux étapes. L'apprentissage où les poids synaptiques peuvent varier pour « apprendre » la tâche assignée au réseau, et l'exploitation où les poids restent fixes, on présente les données d'entrée, les neurones appliquent les poids synaptiques et effectuent une somme pour produire le résultat du « calcul ».

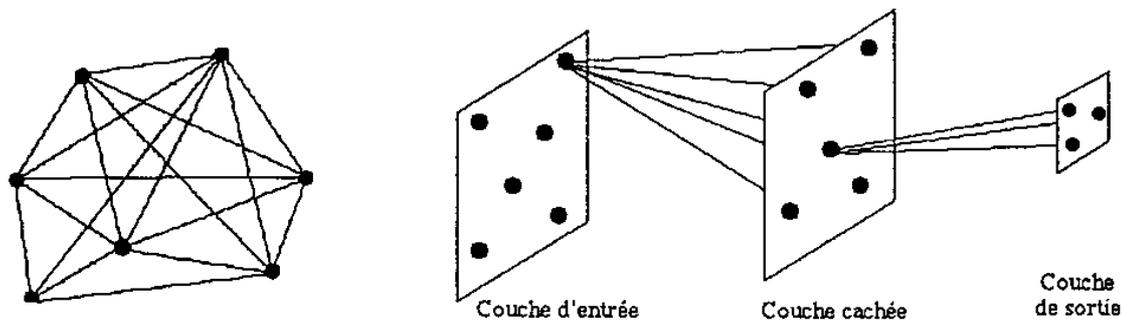


Figure 1: Exemple d'architectures de réseaux de neurones. A gauche : réseau à état d'équilibre. A droite : réseau à couches

L'une des caractéristiques fondamentales de ces modèles est le très grand nombre d'interconnexions entre les neurones, qui sont les "processeurs" élémentaires de ces réseaux. Ce haut degré de connectivité pose des problèmes importants pour l'implantation des modèles, car la communication entre processeurs est justement un des points faibles de la technologie électronique. L'optique semblait donc pouvoir jouer un rôle important pour les interconnexions. Les composants optiques pour réaliser des non-linéarités étaient moins mûrs et souffraient d'un bilan énergétique défavorable par rapport à leurs équivalents électroniques. Les implantations étaient donc en majorité des machines hybrides, opto-électroniques où l'utilisation de l'optique était essentiellement réservée à la partie interconnexion. (Pour un traitement plus détaillé des réseaux de neurones et leurs implantations optiques voir [1] et les références qui y sont citées)

3.2.1 Implantation opto-electronic d'un réseau de neurones

Les travaux de ma thèse se sont centrés justement sur une implantation opto-électronique d'un réseau de neurones. Nous avons choisi un réseau de type Hopfield, appliqué à la reconnaissance de chiffres manuscrits (reconnaissance automatique de codes postaux). Nos travaux ont montré en particulier comment une reformulation du fonctionnement du réseaux en termes de corrélation avec les données d'entrée et de reconstruction des données stockées dans les poids synaptiques permet d'optimiser le calcul des poids synaptiques et adapter le réseau à une implantation opto-électronique. Les figures 2 et 3 montrent le système optique résultant. On note en particulier le MSL utilisé pour présenter les données d'entrée (détails à la section 4.4.1) et l'élément optique diffractif (détails chapitre 5) qui matérialise les poids synaptiques et réalise l'interconnexion des neurones.

Avec ce système nous avons pu démontrer expérimentalement la reconnaissance de chiffres tests à partir de données d'entrée bruitées et déformées et avec une invariance de la reconnaissance à la translation des données d'entrée [6], [7]. Ce montage a été repris par Michel Barge qui l'a étendu à une implantation d'un réseaux de neurones de Kohonen, plus performant ([8] reproduite en annexe 6) permettant alors de traiter une vraie base de données de chiffres manuscrits de La Poste française. J'ai contribué à ce travail pendant mon séjour Post-doc à Paris, surtout par le calcul des EOD d'interconnexion [9].

3.2.2 Implantation optique d'un réseau de neurones

Arrivé à Brest en 1992 ma première tâche à été de poursuivre mes recherches dans l'implantation optique de réseaux de neurones vers une implantation optique de l'apprentissage – tâche nettement plus difficile car il faut stocker les poids synaptiques de façon reconfigurable et définir et contrôler la procédure de mise à jour des poids alors qu'il n'existait pas de technologie de mémoire optique reconfigurable adaptée très performante (à ce jour la situation est encore assez semblable).

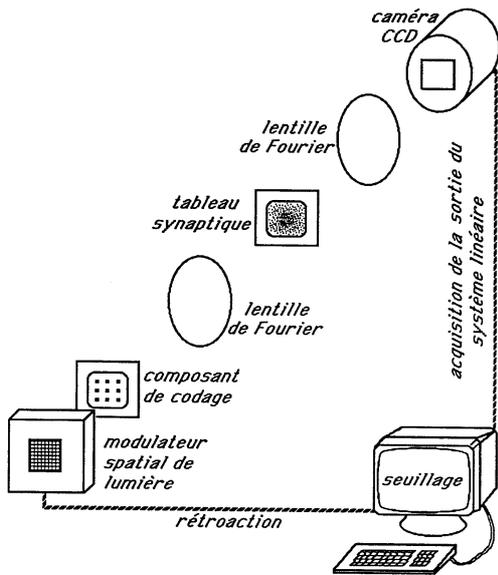


Figure 2: Schéma de principe du système

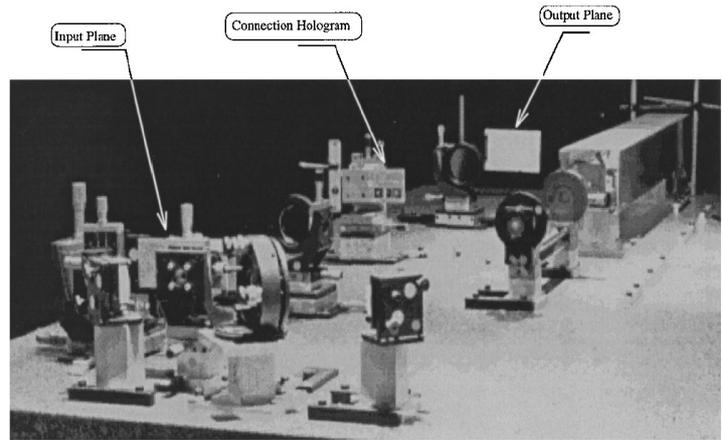


Figure 3: Photographie du système expérimental d'implantation opto-électronique des réseaux de neurones

Les schémas de principe du montage développé se trouvent à la figures 4 et 5. Les données d'entrée sont présentées cette fois ci au moyen d'un MSL à cristaux liquides et les poids synaptiques sont stockés sur un MSL optiquement adressé « BOASLM ». Un système optique à base de microlentilles somme les cartes de poids synaptiques sur un deuxième BOASLM qui effectue une opération non-linéaire de seuillage. L'image résultant sur ce BOASLM est ensuite répliquée par un EOD et imagée sur les cartes de poids sur le premier BOASLM pour les modifier et ainsi permettre l'apprentissage optique. Ces travaux, un des rares exemples d'apprentissage optique, se sont soldés par la thèse de Jérôme Du villier [10] et les publications [11] [12] et [13] (reproduite en annexe 6).

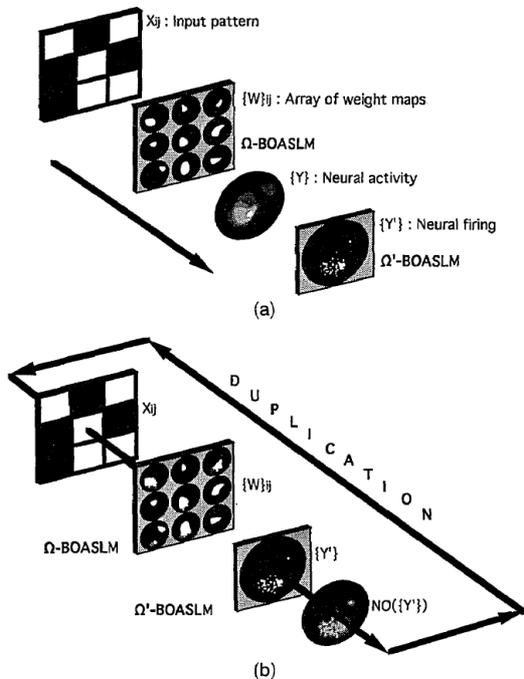


Figure 4: Schéma de principe du système à apprentissage optique

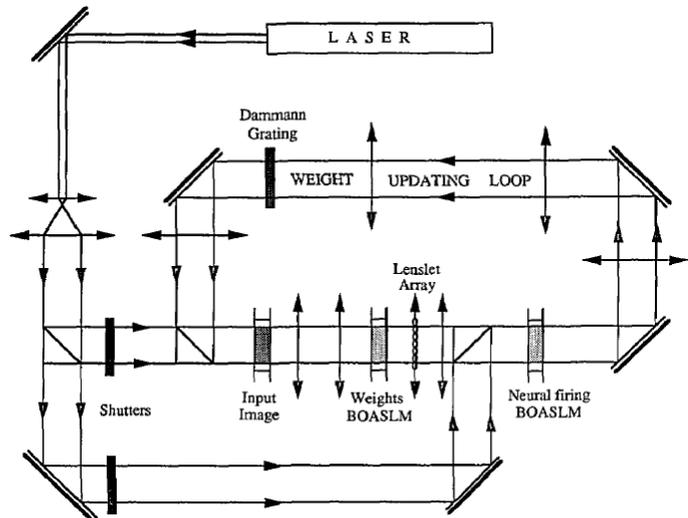


Figure 5: Schéma optique du système expérimental de l'implantation du réseau de neurones à apprentissage optique.

3.3 Reconnaissance de formes pour les applications dans le transport routier

En même temps que ces travaux sur l'apprentissage optique, notre département participait au projet Européen HICOPOS visant un système embarqué de reconnaissance optique de panneaux routiers, automatique et fonctionnant en temps-réel. Bien que ne participant pas formellement à ce projet, je l'ai suivi de près car le système était basé sur la corrélation optique très proche de mes implantations de réseau de neurones et de mes travaux dans le calcul d'EOD et, de plus, utilisait les mêmes MSL électriquement et optiquement adressés (pour plus de détails voir les thèses de Laurent Guibert [14] et Yvon Petillot [15] et les références [16], [17]).

Pour cette raison, quand notre département a été contacté en 2004 par l'entreprise Dotmobil (www.dotmobil.com) qui s'intéressait à un système pour la reconnaissance automatique de la signalisation routière en général (« horizontale » = lignes blanches et « verticale » = panneaux routiers), j'ai été nommé responsable de l'étude. Ces travaux ont démarré par le stage de fin d'études d'ingénieur de Jérôme Ninot. Jérôme a ensuite été embauché par Dotmobil et nous avons continué l'étude à travers de nombreux projets d'élèves. En 2006 Jérôme a poursuivi par le démarrage d'une thèse CIFRE (au sein d'Induct, filiale de Dotmobil) pour laquelle je suis l'encadrant académique.



Figure 6: Véhicule Viamétris équipé pour le relevé et géolocalisation de la signalisation routière.



Figure 7: Exemple de reconnaissance de panneau dans un flux vidéo

Dans le cadre de cette thèse, Jérôme a développé un véhicule spécifique (figure 6), spécialisé dans la reconnaissance de la signalisation routière, équipé de caméras vidéo visibles et IR, d'illuminateurs IR, d'un télémètre laser, d'un GPS et d'un système inertiel très performants pour la géolocalisation ainsi que de systèmes d'électronique et d'informatique embarqués nécessaires pour traiter les flux de données issus des divers capteurs. La première application de ce véhicule a été la reconnaissance, géolocalisation et métrologie des marquages horizontaux (lignes blanches) pour les entreprises responsables de la repeinture de ces marquages. La deuxième concerne la reconnaissance et géolocalisation de la signalisation verticale (figure 7) pour les administrations locales responsables de leur entretien. En effet ces administrations n'ont souvent pas de base de données sur ces panneaux et ne connaissent ni la localisation, ni le type, ni l'âge, ni l'état, ni la pertinence (par exemple interdiction de passer dans une zone où la visibilité est bonne) des panneaux dont elles sont responsables.

Mon rôle dans l'encadrement a surtout consisté en des conseils sur les équipements optiques (caméras, illuminateurs IR ...) et, au travers de projets d'élèves en commun, en la mise au point des algorithmes préliminaires de traitement des données pour en extraire les lignes blanches et les panneaux. Partant du savoir faire acquis dans le projet HICOPOS, nous avons transposé les techniques utilisées en traitement optique vers un traitement électronique, devenu maintenant suffisamment performant pour permettre un traitement proche du temps-réel. Ce traitement est basé à la fois sur la couleur, sur la forme (extraction adaptative de primitifs), sur une corrélation avec des

panneaux types et sur une calibration 3D précise des caméras afin d'effectuer des mesures quantitatives des dimensions des lignes blanches et des panneaux. Les résultats obtenus avec le véhicule et les algorithmes de traitement (dont les détails dépassent maintenant, je l'avoue volontiers, mes connaissances en traitement numérique d'image – j'ai donc aidé Jérôme à trouver des contacts avec d'autres chercheurs spécialisés dans ce domaine) ont décidé Jérôme et son encadrant industriel de créer une entreprise, Viametris (www.viametris.fr), spécifique pour le marché du relevé et de la géolocalisation de la signalisation routière. Jérôme est directeur de cette société, ce qui a retardé quelque peu la rédaction de sa thèse mais qui a contribué à son prix du Jeune Chercheur ITS (Intelligent Transport Systems) Bretagne en 2009. Les travaux sont en cours de publication [18], [19] et la soutenance de thèse est prévue pour fin 2010.

4 Les modulateurs spatiaux de lumière et leur applications hors affichage

4.1 Introduction et définitions

Un Modulateur Spatial de Lumière (MSL ou plus souvent SLM de l'anglais *Spatial Light Modulator*) permet comme son nom l'indique de moduler spatialement une onde lumineuse, par exemple, moduler une onde uniforme avec une image comme le montre la figure 8. L'illustration la plus simple d'un MSL est une diapositive ou un transparent pour rétroprojecteur ou même toute image imprimée qu'on pourrait appeler MSL fonctionnant en réflexion. Cependant ces exemples triviaux ne sont pas habituellement classés dans les MSL car l'image affichée sur l'onde lumineuse est fixe alors qu'est généralement sous-entendu dans le terme « MSL » l'idée de reconfigurabilité : l'image affichée sur l'onde peut changer alors que le MSL reste fixe. C'est pourquoi un projecteur de cinéma classique par exemple n'est pas classé parmi les MSL car bien que l'image empreinte sur l'onde lumineuse et projetée sur l'écran change dans le temps, l'élément qui module cette onde, les différentes images de la pellicule, doivent bouger pour se placer successivement dans le faisceau lumineux. Enfin, dans son utilisation habituelle et pour nos besoins ici, nous utiliserons le terme MSL pour désigner un dispositif qui permet de moduler spatialement une onde lumineuse de façon reconfigurable et *contrôlable par ordinateur* (ou élément de contrôle équivalent).

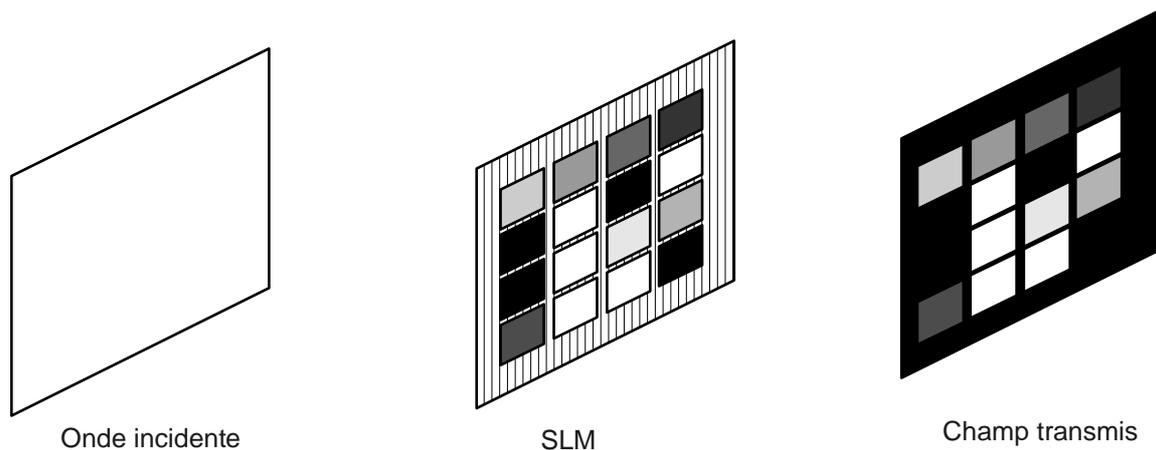


Figure 8: Opération d'un modulateur spatial de lumière

L'application grand public la plus courante des MSL tels que nous les avons définis se trouve certainement chez les afficheurs et écrans plats à cristaux liquides. Les technologies d'écran CRT (*Cathode Ray Tube*), Plasma et LED (*Light Emitting Diode*) sont émissives et ne sont donc pas des « modulateurs » strictement parlant. On voit alors que la technologie MSL est relativement jeune, n'apparaissant de manière commerciale que vers la fin des années 1980. Plus récemment on a constaté dans le monde scientifique/technique un glissement du sens du terme MSL qui se réserve de plus en plus aux micro-écrans (souvent de dimensions maximales de quelques dizaines de cm^2) utilisés typiquement dans les vidéo-projecteurs.

Depuis plusieurs années ces micro-écrans ont trouvé des applications de plus en plus importantes et variées en dehors du domaine de l'affichage proprement dit: traitement optique de l'information (« optical computing »), mémoires holographiques, affichage holographique (3D), photoinscription parallèle, analyse de faisceau, commutation de communications optiques, pincettes optiques (« optical tweezers »). Dans la suite de ce chapitre nous présentons notre contribution au

développement des MSL et à leurs applications dans plusieurs de ces domaines. En même temps, nous essayerons d'indiquer les raisons pratiques pour le choix du MSL dans chaque application - dans le but espéré de pouvoir servir d'aide ou de guide dans le choix de MSL pour d'autres applications semblables.

Avant d'aborder ces travaux, et pour mieux comprendre les critères de choix des technologies de MSL et surtout l'adaptation des performances et des caractéristiques des MSL à chaque application nous présentons rapidement les caractéristiques importantes des MSL permettant de les comparer et aussi les différentes familles de MSL avec leurs avantages et inconvénients respectifs.

4.2 Caractéristiques principales des MSL

Comme je l'ai expliqué ci dessus, l'application majeure, grand public des MSL se trouve dans les afficheurs (moniteur d'ordinateur, écran de téléphone portable ...). Dans ces applications les caractéristiques les plus importantes sont le contraste, la luminosité, la résolution (nombre et taille des pixels), le taux de rafraichissement, la gamme de couleurs, la consommation électrique, le coût ... Pour ce qui nous intéresse dans ce chapitre - les applications hors affichage - ces critères sont importants mais se trouvent souvent exprimés différemment et d'autres deviennent plus importants, par exemple le type de modulation. Pour l'affichage, la modulation est pratiquement toujours une modulation d'amplitude alors que dans plusieurs des applications citées dans l'introduction, une modulation de phase est souvent plus appropriée. Dans ce qui suit, nous présentons les critères les plus importants pour les applications hors affichage.

Nombre de pixels

De manière générale, on recherche un nombre de pixels le plus important possible par exemple pour maximiser la quantité d'information traitée dans des applications de traitement optique de l'information ou la vitesse de traçage dans les applications de phototraçage. Les premiers MSL présentaient des nombres de pixels tels que 100x100. Grâce au développement récent des afficheurs TVHD (Télévision Haute Définition), des MSL avec ~2000x1000 pixels deviennent maintenant relativement communs. Cette course aux pixels n'est cependant pas universelle – dans certaines applications elle peut être tempérée par d'autres critères : plus de pixels complique souvent la transmission des données vers le MSL et peut limiter le taux d'affichage de l'information (nombre d'images différentes par seconde).

Taille des pixels

Contrairement à l'affichage, où l'on recherche des téléviseurs/moniteurs de plus en plus grands, dans les applications comme le phototraçage et l'affichage holographique, on recherche souvent des pixels de plus en plus petits car cela permet de simplifier les optiques de projection (ouverture plus petite) et d'augmenter la résolution. Ici encore cependant il existe souvent un compromis technique entre la taille de pixel et l'efficacité énergétique. Avec chaque technologie il existe un espace inter-pixel minimal (zone « morte » qui ne module pas l'onde lumineuse) et donc pour un pixel plus petit, le *taux de remplissage* (rapport entre la surface modulante d'un pixel et sa surface totale = « fill factor ») diminue, réduisant ainsi l'efficacité énergétique du MSL. Le compromis choisi par la plupart des constructeurs semble actuellement se situer autour d'un taux de remplissage de 90% et de pixels sur un pas de l'ordre de 10 microns.

Type de modulation

Poussé par l'industrie de l'affichage, le type de modulation le plus courant est la modulation d'amplitude, obtenue directement avec la technologie MEMS (micro-miroirs) et à l'aide de la modulation de polarisation et de polariseurs/analyseurs pour les MSL à cristaux liquides. Ces derniers offrent plus de possibilités – le choix judicieux du type de cristaux liquide, la mise en œuvre (alignement, épaisseur de cellule ...) et le type et l'orientation de polariseurs permettant des modulations en amplitude (binaire ou niveaux de gris), de polarisation, de phase (binaire ou continue) ou des combinaisons de la modulation simultanée de phase et amplitude [20].

Contraste/linéarité

Le contraste quantifie la différence entre les états de transmission/absorption des pixels du MSL, par exemple, pour une modulation d'amplitude, le rapport entre l'énergie de l'onde transmise par un pixel à l'état allumé (« ON ») et un pixel à l'état éteint (« OFF »). Habituellement on cherche des contrastes les plus élevés possible – des MSL atteignant aujourd'hui des contrastes au delà de 1:1000. (Noter que la définition de contraste utilisée ici n'est pas celle de l'interférométrie qui elle varie entre 0 et 1). Pour une modulation (d'amplitude ou de phase) continue, en plus de la gamme d'états disponibles, c'est la linéarité et le nombre d'états différents (ex. nombre de niveaux de gris) qui importe. Aujourd'hui 256 états (8 bits de modulation) constituent une performance courante pour les MSL. Cependant la linéarité de cette modulation est souvent imparfaite et une étape de correction à l'aide de tables de correspondances (LUT ou « Look Up Tables ») obtenues par des calibrations expérimentales, est nécessaire [21] particulièrement pour un bon contrôle de la phase.

Réponse spectrale

La position et la largeur du domaine spectral correctement modulé (contraste et transmission élevés) est également un critère important. Pour l'affichage visuel, il suffit que le MSL couvre le domaine du visible (~400-700nm). Pour d'autres applications d'autres parties du spectre peuvent devenir importantes : l'ultra violet (UV) pour augmenter la résolution et s'adapter aux matériaux photosensibles dans les applications de phototraçage et l'infra-rouge pour les applications de commutation de signaux de télécommunications optiques. Pour une opération hors du spectre visible, il faut souvent un MSL spécifique ou il faut modifier un MSL « grand public » conçu pour l'affichage dans le visible. Se posent alors les questions importantes du coût et de la disponibilité.

Temps de réponse

Pour les applications d'affichage, un temps de réponse permettant la cadence vidéo (~50 images/s) est généralement suffisant. Dans les applications qui nous intéressent ici, on recherche quasi systématiquement des temps de rafraîchissement aussi courts que possible car cela permet par exemple de traiter l'information ou de tracer des données plus rapidement. La limitation fondamentale sur le taux d'affichage dépend du temps de réponse (et relaxation) de la technologie de MSL utilisée. Pour les grandes familles de MSL on peut typiquement tabler sur des temps de réponse autour de 10ms pour des MSL à cristaux liquides nématiques (taux de rafraîchissement ~ 100Hz), autour de quelques 100µs pour les cristaux liquides ferroélectriques (taux de rafraîchissement ~ quelques kHz) et autour de 10µs pour des MEMS (taux de rafraîchissement ~ quelques kHz). (Noter qu'il existe d'autres familles, plus rares, de MSL basées sur d'autres technologies plus rapides; ils seront présentés dans la section 4.3). Le choix de MSL basé sur le taux de rafraîchissement est cependant compliqué par le type de modulation requis – les MEMS et les MSL à cristaux liquides ferroélectriques sont fondamentalement des modulateurs binaires, la modulation multi-niveaux étant obtenue par un multiplexage temporel. Pour les applications qui ont besoin de modulation multi-niveaux, un modulateur à cristaux liquides nématiques peut alors parfois offrir des taux de rafraîchissement effectifs plus élevés que pour les MEMS ou CL

ferroélectriques.

Interface électronique/informatique

Le taux effectif de rafraîchissement des images dépend souvent aussi de l'interface électronique du MSL. Sur les MSL modernes, on a couramment plus d'un million de pixels avec 24 bits de modulation (3 couleurs de 8 bit), ce qui pour un taux de rafraîchissement de 100images/s dépasse largement un taux de transfert de données bruts de 1Gbit/s. De tels taux de transfert nécessitent une interface électronique de haute performance qui atteint des prix raisonnables seulement en production de masse – par exemple dans une carte graphique – et donc pour des applications spécifiques. Pour une utilisation en laboratoire de recherche on se trouve souvent devant un compromis. Pour atteindre les taux de rafraîchissement maximaux possibles avec une technologie de MSL donnée on est souvent obligé soit de se plier aux formats de données des applications grand public (par exemple 24bits de couleur en multiplexage temporel alors qu'on cherche à afficher des images binaires aussi vite que possible), soit d'accepter un taux de rafraîchissement effectif souvent un ordre de grandeur en dessous du maximum possible, soit encore (avec un interface petite série, souvent onéreux) d'accepter d'obtenir un taux de rafraîchissement maximal seulement pour un nombre limité d'images, transférées à l'avance sur l'électronique du MSL.

Efficacité énergétique

En plus de moduler l'onde incidente, tout MSL absorbe une partie de l'énergie incidente, ou le diffuse/diffracte en dehors de l'onde utile de sortie. Cette efficacité varie souvent d'un bout à l'autre du spectre utilisé. Le taux de remplissage a également un effet direct sur l'efficacité. Enfin, la comparaison des efficacités n'est souvent pas aisée car elle dépend de l'utilisation (modulation de phase, amplitude, en imagerie ...) et il n'y a pas de normalisation de la procédure de mesure.

Les efficacités typiques globales citées aujourd'hui sont aux environs de de 70% pour les MEMS [22] pour le spectre visible. Des versions spéciales des MEMS permettent d'obtenir des performances semblables dans l'UV jusqu'à ~350nm et dans l'IR proche jusqu'à ~1700 nm. Les efficacités sont du même ordre pour les MSL à CL (voir par exemple [23]) hors absorption de polariseurs – cependant ici l'efficacité énergétique obtenue en pratique dépend beaucoup du type de modulation (amplitude ou phase) et de l'application (imagerie ou diffraction). Les MSL à CL standards couvrent généralement le spectre visible et le proche IR, leur efficacité varie d'un bout à l'autre spectre mais peut souvent être optimisée pour une modulation à une longueur d'onde spécifique par un contrôle plus fin de l'électronique d'adressage [21]. Cependant l'utilisation de MSL à CL dans l'UV (en-dessous de 400 nm) n'est généralement pas possible: les photons UV sont absorbés par les CL et endommagent souvent les molécules de CL.

Puissance optique maximale

L'absorption d'une partie de la lumière incidente par des MSL impose souvent une limite maximale sur la puissance optique acceptable – le dispositif pouvant chauffer. Pour les applications en traitement optique de l'information, cela est rarement un problème car les puissances optiques sont généralement assez faibles. Cependant, dans les applications telles que le phototraçage, ou la mise en forme de faisceaux, on cherche de fortes puissances pour augmenter la vitesse de photo-inscription et c'est la MSL qui parfois est l'élément limitant.

Pour les MSL dérivés des afficheurs pour vidéo-projecteur les puissances optiques crêtes acceptables sont relativement hautes, allant jusqu'à quelques watts si le MSL est refroidi. Notez ici que les MSL en réflexion ont l'avantage de pouvoir être refroidis plus facilement et plus

efficacement par un contact physique sur la face arrière.

Coût/disponibilité

Grâce au marché des vidéo-projecteurs des MSL avec de très hautes performances (>2 Mpixels, taux de rafraîchissement de plus 1000 images/s, pixels $\sim 10\mu\text{m}$...) sont maintenant disponibles en volume pour environ 1000€ voire moins. Cependant ces prix sont atteints seulement pour l'achat de plusieurs milliers d'éléments et on se trouve contraint très souvent d'utiliser un adressage par des signaux vidéo standards avec ses inconvénients : taux de rafraîchissement fixes, affichage en niveaux de gris par multiplexage temporel en schéma fixe propriétaire, difficulté de synchroniser l'affichage avec d'autres équipements ... En gros on n'arrive pas toujours à afficher ce qu'on veut sur les pixels du MSL. Pour une utilisation en laboratoire on n'a souvent besoin que de quelques MSL, les fabricants refusent de vendre en si petites quantités donc on doit passer par un revendeur (ex. [23], [24], [25]) et les prix augmentent fortement. De plus si les « kits » de développement que proposent ces revendeurs permettent parfois un contrôle plus fin du MSL c'est souvent au prix des performances réduites en termes de taux de rafraîchissement – voire du nombre d'images différents qu'on peut afficher en un temps donné. On a souvent un compromis entre le taux de rafraîchissement effectif disponible et le coût du « kit » et on se trouve rapidement devant des kits de 10 000€ et plus.

Enfin, pour les besoins des projets de recherche on a souvent recours à un MSL optimisé pour une partie du spectre hors du visible. Cela est généralement tout à fait possible techniquement (par exemple changement d'épaisseur d'un MSL à CL ou changement du mélange de CL). Mais soit les constructeurs refusent tout simplement la fourniture car le marché est trop petit, soit ils acceptent mais seulement à partir de gros volumes – ou à des prix très élevés.

En pratique donc la question de disponibilité est un critère clé dans le choix d'un MSL pour un projet de recherche : on doit accepter des performances souvent bien en deçà de ce qui est techniquement possible pour des questions de disponibilité/coût. On voit que ce choix est donc un exemple parfait du « compromis d'ingénierie » au cœur du travail de l'ingénieur.

4.3 Différentes technologies MSL

Il existe plusieurs technologies de MSL. Notre but ici n'est pas d'être exhaustif mais simplement d'indiquer les grandes familles et leurs avantages/inconvénients, particulièrement pour les applications hors affichage qui nous intéressent. Pour une discussion plus détaillée on se référera par exemple à la référence [26]

4.3.1 MSL à cristaux liquides

Les MSL à cristaux liquides fonctionnent grâce aux propriétés particulières des molécules de CL qui permettent de les orienter à l'aide de champs électriques et donc de changer leurs propriétés optiques « apparentes » (c'est à dire les propriétés que « voit » une onde lumineuse qui les illumine), par exemple l'indice de réfraction, la birefringence ... En pratique ils sont mis en œuvre en couches fines entre deux électrodes, typiquement deux plaques de verre recouvertes d'électrodes transparentes. A l'aide de ces électrodes on applique des champs qui varient localement et on peut contrôler alors localement (pour chaque « pixel ») les propriétés optiques: on tourne la polarisation de l'onde incidente, on déphase l'onde, on rend le pixel transparent ou diffusant ... Pour une synthèse des divers effets possibles voir [20].

On distingue deux grandes familles de MSL à CL : nématiques et ferroélectriques (strictement une sous-classe des CL smectiques). Les nématiques sont de loin les plus courants dans les afficheurs, connus pour leur mise en œuvre plus facile, leur stabilité, leur modulation continue (donc modulation directe de plusieurs niveaux de gris ou de phase) et leurs temps de commutation compatibles avec la cadence vidéo. Les ferroélectriques sont souvent plus délicats à mettre en œuvre (du moins en production de masse) et offrent essentiellement une modulation binaire. Leur grand avantage est un temps de commutation nettement plus court qui permet un taux de rafraîchissement très élevé. Malgré plusieurs essais de diffusion à grande échelle, par exemple par Displaytech [27] et Forth Dimensions Displays [28] (ex CRLOpto Ltd) la relative difficulté de mise en œuvre des MSL ferroélectriques et la nécessité d'un multiplexage temporel pour obtenir un affichage en niveaux de gris/couleur qui limite le taux de rafraîchissement effectif ont jusqu'à maintenant empêché l'apparition de ces MSL dans les applications d'affichage grand public. Cependant leur utilisation est beaucoup plus répandue en recherche ou dans les applications haute performance (ex militaires) ou leur rapidité est un atout majeur (Boulder Non-Linear Systems [29] s'adresse tout particulièrement à ce marché).

L'adressage d'un MSL peut-être « passif » (simples électrodes conductrices) ou « actif » (chaque pixel comporte un minimum d'électronique d'adressage). L'adressage passif est plus simple, moins cher et permet généralement un meilleur taux de remplissage. L'adressage actif cependant améliore nettement la performance en termes de contraste, de taux de rafraîchissement, de stabilité et d'uniformité de l'image à tel point que l'adressage passif est réservé maintenant aux afficheurs très bas-coût. Les MSL réfléchissants sur circuit silicium (« Silicon Backplane ou « LCoS » - Liquid Crystal on Silicon) placent l'électronique d'adressage derrière un miroir sur chaque pixel plutôt que dans l'espace inter-pixel et donc bénéficient de taux de remplissage améliorés par rapport aux MSL transmissifs. Cette technique permet aussi des électroniques d'adressage plus sophistiquées et plus rapides, d'où une utilisation plus fréquente avec les MSL à CL ferroélectriques à commutation rapide.



Figure 9: Exemple de MSL en transmission à CL nématique (Epson)

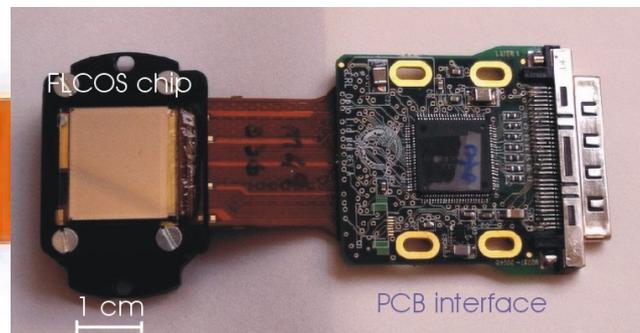


Figure 10: Exemple de MSL ferroélectrique LCoS (CRLOpto)

4.3.2 MSL à micro-miroirs MEMS

Les MEMS ou « Micro-Electro-Mechanical Systems » [30] sont des systèmes micro-mécaniques, fabriqués à partir de et sur un substrat silicium à l'aide de techniques très mûres de la photo-lithographie pour micro-électronique. L'application locale de tensions électriques sur le circuit silicium sur lesquels ces systèmes sont construits permet d'actionner les parties micro-mécaniques à des fréquences très élevées. Très rapidement, on a réalisé des MSL à base de MEMs comportant des micro-miroirs (MOEMS « Micro-Opto-Electronic Mechanical Systems » [31]) pour les applications optiques. Plusieurs configurations de micro-miroir pour MSL existent. Les miroirs orientables continument en une direction et les miroirs « 3D » orientables en 2 directions ont été utilisés pour les applications en commutation de signaux de télécommunications optiques [32]. Les « valves de lumière » ([33], [34] [35]) opèrent en tant que réseaux de diffraction reconfigurables.

Les miroirs déformables, [36] où les tensions appliqués localement déforment une membrane modulant ainsi en phase l'onde réfléchiée sont utilisés souvent pour la correction adaptative de front d'onde [37]. Cependant la configuration la plus couramment développée et appliquée en tant que MSL est celle des puces DMD (Digital Micromirror Device) de chez Texas Instruments, illustré aux figures 11 et 12.

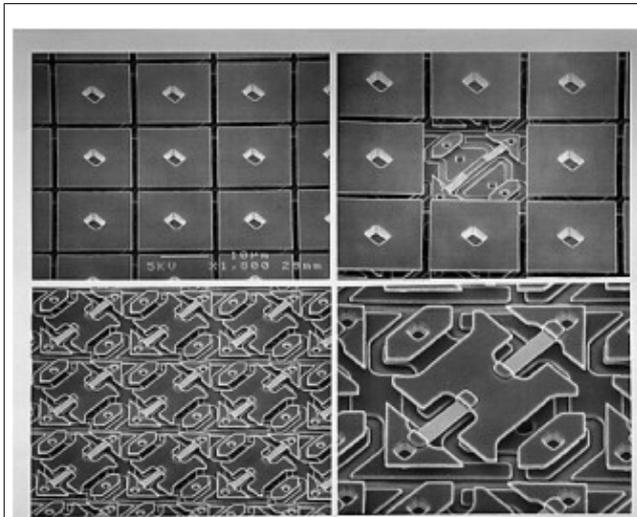


Figure 11: photographies au microscope de la structures d'une puce DMD (versions préliminaires)

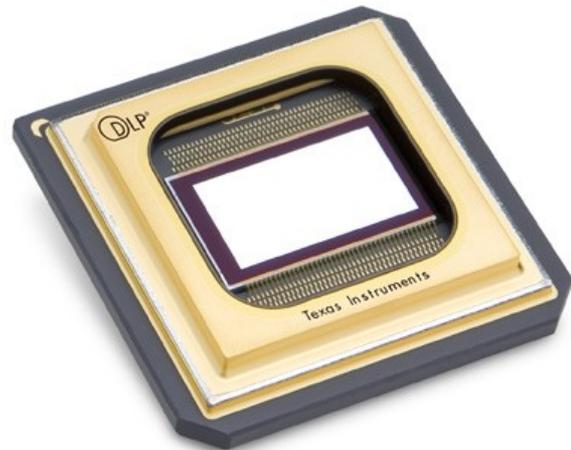


Figure 12: Exemple d'un MSL à DMD de chez Texas Instruments utilisé, par exemple, dans notre phototraceur UV.

Texas Instruments développe cette solution depuis plus 30 ans et elle est arrivée à un tel degré de maîtrise et de performance qu'elle est pratiquement la seule entreprise à proposer des MSL de ce type sur le marché (l'Institut Fraunhofer pour Microsystems Optiques [38] en propose également mais pour des marchés niches [39]).

Les avantages principaux des MSL à MEMs sont leur rapidité (taux de rafraichissement de plusieurs kHz), le contraste très élevé, la couverture spectrale (tout le visible avec versions optimisées pour le proche IR et l'UV), les puissances optiques maximales élevées (jusqu'à plusieurs W) et leur maturité technologique : Texas dit maintenant équiper plus de 50 % des projecteurs vidéo vendus dans le monde. Leurs inconvénients pour les applications qui nous intéressent ici sont la modulation fondamentalement binaire et d'amplitude qui réduit leur rendement optique effectif dans certaines applications (ex. élément diffractif reconfigurable), leur fonctionnement en réflexion et surtout l'illumination peu commode (à 24° par rapport à la normale au plan des miroirs et 45° par rapport aux axes de la matrice des miroirs) qui complique le système optique et, enfin, leur disponibilité/coût en petites quantités. En effet n'ayant pas de vrais concurrents les prix des kits de développement de DMD restent relativement élevés si l'on veut profiter des taux de rafraichissement maximaux et il est souvent difficile d'avoir des informations précises sur les interfaces de pilotage qui restent propriétaires et fermés

4.3.3 MSL à effet magnéto-optique.

Ce type de modulateur était un des premiers MSL disponibles commercialement et donc a été important aux débuts de l'introduction des MSL dans les systèmes optiques. Il était basé sur l'effet Faraday (rotation de la polarisation de la lumière par un champ magnétique) dans un grenat de fer. On retrouvera une explication plus complètes de ce type de modulateur dans la référence [40]

Son grand défaut était son efficacité optique faible et, avec l'apparition de MSL

commerciaux à cristaux liquide et à MEMs, cette technologie a rapidement été dépassée.

4.3.4 MSL à puits quantiques

Ces modulateurs utilisent des effets électro-optiques dans des structures à multiples puits quantiques de matériaux semi-conducteurs, souvent l'AsGa. Leur principal avantage est leur taux de rafraîchissement très élevé, typiquement plusieurs centaines de kHz et parfois des MHz sont annoncés. Cependant, sans parler du problème important de la fourniture de données image au MSL à ces taux, puisque de tels taux ne sont pas nécessaires pour des applications grand public comme l'affichage, la commercialisation reste pour l'instant à petite échelle pour des marchés niches. Les composants restent donc chers, les nombres de pixels restent modestes (quelques 100x100) et la technologie est loin d'être aussi mûre que les MSL à CL ou à MEMs. (voir [26] pour une présentation de ces MSL et [41] et [42] pour des exemples de réalisations).

4.3.5 MSL optiquement adressés

Tous les modulateurs décrits ci dessous sont adressés par commande électrique, cependant il est également possible d'adresser un MSL optiquement : le modulateur est illuminé par une distribution lumineuse (image) qui peut être enregistrée sur le modulateur et relue par un autre faisceau – par exemple avec plus de puissance (amplification) ou à une autre longueur d'onde (conversion). Ces MSL ont connu beaucoup de développements dans les années 1990 pour des applications de traitement optique de l'information où ils apportaient les fonctions non-linéaires (bistabilité, seuillage, mémoire ...) [43] [44] [45] [46]. Cependant, ici encore, faute d'une application grand public, le développement s'est fortement ralenti et il n'y a apparemment plus de fournisseurs industriels.

4.4 Projets et Contributions aux MSL et à leurs applications

4.4.1 Réseaux de neurones Hopfield et MSL Magnéto-Optique

Dans le chapitre 3 j'ai présenté le dispositif expérimental d'une implantation opto-électronique d'un réseau de neurones formels qui formait le cœur de mes travaux de thèse de doctorat [47]. Un élément clé de ce dispositif était le MSL magnéto-optique « SIGHT-MOD » de l'entreprise Semetex Corp.

Le choix du modulateur était relativement simple car il était pratiquement le seul disponible commercialement à l'époque. Le modulateur comportait 48x48 pixels sur un pas de 127microns et permettait un taux de rafraîchissement théorique d'environ 300 images/s, mais qui en pratique était bien en deçà, limité par la simplicité de l'interface avec le PC de pilotage (là aussi, on était aux débuts de l'introduction des PC dans les laboratoires pour le pilotage de dispositifs expérimentaux). Ce modulateur a permis de mener à bien le dispositif expérimental (publications [7], [8], [48]) et a contribué aux débuts des travaux sur les implantations expérimentales des systèmes de traitement optique de l'information, montrant la faisabilité et l'importance des technologies naissantes de MSL. Cependant, le grand défaut de ce MSL était sa faible efficacité énergétique (moins de 2% à la longueur d'onde d'utilisation de 632,8nm). Rétrospectivement, l'intérêt principal de ce MSL vient sûrement du fait qu'il a permis d'acquérir une expérience avec un premier MSL pratique et d'identifier l'importance des caractéristiques clés comme la limitation du taux de rafraîchissement imposée par l'interface électronique.

4.4.2 Réseaux de neurones Kohonen et les modulateurs Ferroélectriques

Dans les débuts des années 1990, les premiers MSL à cristaux liquides ferroélectriques commençaient à apparaître, d'abord au travers des collaborations avec les laboratoires de recherche des industriels fabricants et plus tard commercialement, proposés par des entreprises comme Central Research Laboratories (CRL) en Grande Bretagne et DisplayTech et Boulder Non-Linear Systems aux États Unis. Arrivant au département d'optique de Telecom Bretagne j'ai pu profiter des relations avec CRL pour bâtir une implantation expérimentale opto-électronique (figure 13) d'un réseau de neurones formels autour d'un MSL CRL à adressage électronique et de deux modulateurs optiquement adressés réalisés dans les salles blanches du département d'optique [49]. Grâce à notre maîtrise croissante de l'utilisation des MSL et à cet accès aux technologies MSL les plus performantes de l'époque, ces travaux, décrits plus en détail à la section 3, nous ont permis de montrer un des rares cas d'auto-organisation optique dans un réseau de neurones optiques. Cette étude s'est soldée par plusieurs publications ([11] [13] et [12]) et la thèse de doctorat de Jérôme Duvillier [10].



Figure 13: Photographie du montage expérimental de l'apprentissage neuronal optique.

4.4.3 Projet DRAWMAP – phototraçage massivement parallèle

L'expérience avec les MSL à cristaux liquides dans les applications autres que l'affichage et nos besoins dans le domaine de la fabrication de micro-optiques diffractives (section 5.4) nous ont conduits à proposer le projet Européen DRAWMAP (détails administratifs en annexe 3) où l'on a utilisé un MSL en tant que masque optique reconfigurable pour trois applications de phototraçage. Dans le montage proposé, le MSL était imagé dans une couche de matériaux photosensibles (photorésine, émulsion argentique ...). L'avantage de cette approche sur les techniques existantes de phototraçage était l'écriture massivement parallèle des motifs avec plusieurs centaines de milliers de pixels à la fois, d'où des vitesses d'écriture nettement plus élevées que dans les approches mono-faisceau équivalentes.

Pour cette application, les critères les plus importants dans le choix du MSL étaient la transparence aux longueurs d'ondes de travail (ex. 436nm pour la photorésine), l'opération en transmission (remplacement d'un masque fixe fonctionnant en transmission), la taille et nombre de pixels (vitesse d'écriture) et surtout la possibilité d'alimenter le MSL rapidement avec de grandes quantités de données à tracer (motifs de plusieurs cm² avec une grille d'adressage de 1µm, donc

jusqu'à plusieurs dizaines de Go de données). Les problèmes d'interface indiqués ci-dessus nous ont conduits à rejeter des MSL à cristaux liquides ferroélectriques, alors qu'ils étaient disponibles et, sur le papier, très performants en termes de taux de rafraîchissement. Cependant en pratique on ne pouvait afficher rapidement qu'un nombre limité d'images préchargées sur l'électronique du MSL. Nous avons donc sélectionné un MSL à cristaux liquides nématiques « grand public » de chez Philips (640x480 pixels, pas de la matrice active 88,5 μ m, rafraîchissement 30Hz) compatible avec un pilotage par carte vidéo. Le pilotage par carte vidéo a simplifié la mise au point d'un logiciel de pilotage du phototraceur car on a pu profiter des bibliothèques de programmation graphique standard. Mais il a surtout permis des taux effectifs d'affichage des données images à tracer élevés. Ainsi ce n'était plus le MSL et les transferts de données qui limitaient la vitesse de tracer mais la puissance de la source et la rapidité des platines de translation du substrat.

Ces travaux ont été réalisés dans le cadre de la thèse de Marwa Elbouz et le projet Post-Doctoral de Carole Moussu. Les techniques développées dans ce projet DRAWMAP sont appliquées depuis par le partenaire Miva Technologies [50] dans l'industrie de fabrication de circuits imprimés. Le projet a également permis de doter le département optique de moyens de fabrication d'EOD très performants qui sont à l'origine de la création de la société Holotetrix de prototypage de ces optiques. Le phototraceur DRAWMAP a depuis profité des évolutions technologiques des MSL pour améliorer continuellement ses performances. Le MSL Philips a été d'abord remplacé par un MSL Sony/Epson (800x600 pixels sur pas de 33 μ m) et tout récemment par un MSL Epson (1400x1050 pixels sur pas de 20,5 μ m). Avec chaque remplacement du MSL le phototraceur a gagné en résolution (taille minimale des motifs tracés), en vitesse (plus de pixels par trame et plus de trames par seconde) et d'autres critères comme le contraste qui améliorent la précision du contrôle de la hauteur des micro-structures réalisées. Une description plus détaillée du phototraceur DRAWMAP se trouve à la section 5.4.2 et dans la publication [51] reproduite en annexe 6.

4.4.4 *Projet LASSAR – analyse de faisceau*

Le projet LASSAR était un autre projet de la Communauté Européenne (détails en annexe 3) dont j'étais le responsable à l'ENST Bretagne. Ce projet avait pour objectif de développer une nouvelle technique d'analyse et de mesure de fronts d'ondes et de structures micro- et nanométriques (ex micro optiques). La technique étudiée était fondée sur l'illumination des structures par plusieurs fronts d'ondes différents mais connus et l'analyse des figures de diffraction ([52] [53] ainsi produites. Les fronts d'onde d'illumination connus étaient engendrés par MSL comme indiqué à la figure 14. Les avantages principaux attendus de cette approche, par rapport aux techniques concurrentes comme le microscope interférométrique à décalage de phase ([54]), étaient un fonctionnement sans mouvement (pas de déplacement piézo-électrique) et un traitement numérique des données rapide et multi-échelle, grâce aux possibilités de fronts d'onde d'illumination variés (ex ondes divergentes).

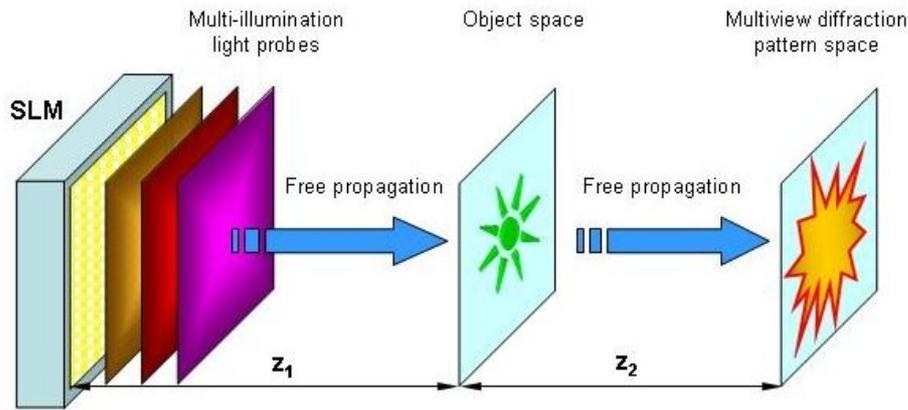


Figure 14: Schéma de principe du dispositif expérimental d'analyse de structures micrométriques par multi-illumination du projet LASSAR

Par simulation numérique préalable du système expérimental, nous avons identifié qu'un nombre limité (<10) d'ondes d'illumination modulées en phase suffisait à garantir et accélérer fortement la convergence des algorithmes de déconvolution nécessaires pour trouver la forme 3D de l'objet inconnu à partir des différents figures de diffraction (figure 15). Comme conséquence, contrairement aux applications mentionnées ci dessus, la performance de l'interface électronique du MSL n'était pas un paramètre critique. D'autres critères comme un très bon contrôle, reproductibilité et connaissance de la phase des fronts d'onde générés et la facilité de synchronisation avec la caméra CCD utilisée pour capter les figures de diffraction, étaient nettement plus importants. Le choix s'est porté sur un MSL à CL ferroélectriques (LCOS Displaytech de 256×256 pixels sur pas de $15 \mu\text{m}$), qui, à l'aide d'un polariseur de sortie, produit une modulation de phase binaire parfaitement contrôlée. L'interface électronique qui permettait l'affichage très rapide d'environ cent images binaires suffisait largement dans ce cas. Ces travaux qui ont fait l'objet de la thèse d'Alexandre Mazine n'ont pas été publiés, principalement à cause des contraintes de confidentialité des partenaires industriels. Ces contraintes sont maintenant levées et une publication est en cours de préparation.

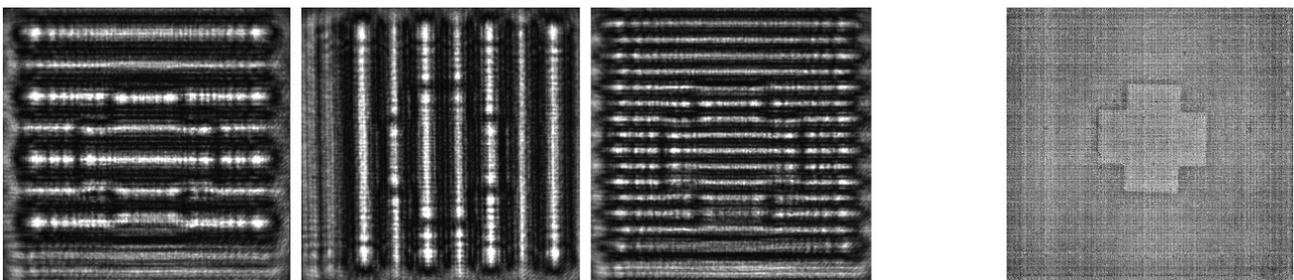


Figure 15: Projet LASSAR. Gauche, trois vues des figures de diffraction expérimentales d'un objet de phase inconnu illuminé par trois ondes différentes. Droite, reconstruction de l'objet inconnu.

4.4.5 Pincettes optiques

Comme indiqué au chapitre 2 sur mon parcours scientifique, j'ai eu la chance de bénéficier en 2002-3 d'un séjour sabbatique à l'université d'Edinbourg, passant environ deux jours par semaine chez CRLOpto, fabricant de MSL, LCOS ferroélectriques, et partenaire de l'université d'Edinbourg et du département optique de Telecom Bretagne. Ce séjour m'a permis de découvrir de nouvelles applications des MSL (celles qui intéressaient mon université d'accueil) et d'apporter une contribution basée sur nos savoir-faire et expérience de la mise en œuvre de MSL. Nos travaux

communs sur les pincettes optiques sont un exemple de cette collaboration.

Une pincette optique (voir [55] et [56] pour une revue générale) fonctionne à l'aide d'un laser (relativement puissant, typiquement plusieurs 100mW dans l'IR proche) qui est focalisé dans un échantillon (par exemple des cellules biologiques ou micro-sphères dans un liquide) par un objectif à fort grandissement. Si la puissance optique dans la tache de focalisation est suffisante et si la différence d'indice de réfraction entre le liquide et les cellules ou sphères est adaptée, il se produit alors un effet de piégeage (par effet de force de radiation générée par le transfert de quantité de mouvement lors de la réfraction de la lumière par l'échantillon.) des cellules/sphères dans la tache de focalisation. Les pincettes optiques trouvent naturellement des applications très importantes dans la biologie cellulaire où elles permettent aux chercheurs de manipuler des cellules individuelles, mais également dans plusieurs autres domaines comme la nanofabrication.

Lors de mon séjour à Edinbourg, la Faculté de Physique venait de mettre au point quelques systèmes de pincettes optiques pour le groupe de recherche COSMIC [57] dont le but est de fournir des outils optiques très performants de caractérisation et manipulation de structures aux chercheurs des sciences du vivant. A l'époque les pincettes optiques n'étaient pas disponibles commercialement. Cependant ces pincettes, réalisées à l'aide d'un faisceau laser donc mono-piège, permettaient seulement de fixer une cellule et puis de bouger le reste de l'échantillon autour, à l'aide de platines de support à micro-translations. D'autres équipes travaillant sur les pincettes optiques avaient réussi à contourner ce problème en créant de multiples pièges à l'aide d'éléments diffractifs (EOD), d'abord fixes [58] et ensuite reconfigurables [59]. Ces équipes utilisaient un MSL pour afficher des EOD calculés par ordinateur pour produire les pièges reconfigurables, très appréciés des utilisateurs car ils pouvaient alors manipuler plusieurs cellules à la fois. Cependant le choix d'un MSL à CL nématique et la lenteur de calcul et d'affichage des EOD ne permettaient pas une manipulation en temps réel. Notez ici que les modulateurs DMD sont peu adaptés, car beaucoup moins efficaces (en termes d'énergie) pour l'affichage d'EOD de phase, que les modulateurs à CL.

Grâce à la collaboration avec CRLOpto nous avons pu bénéficier d'un modulateur à CL ferroélectrique rapide (1000Hz) qui, moyennant une reprogrammation de l'interface électronique, a permis pour la première fois de multiplexer temporellement différents EOD et ainsi produire simultanément plusieurs pièges contrôlables indépendamment. De plus en programmant la carte graphique directement (bibliothèque OpenGL qui accède aux processeurs parallèles de la carte graphique) nous avons réussi à afficher des structures diffractives simples (réseaux et microlentilles) modifiables en temps réel (> 30 images/s) fournissant un vrai contrôle en temps réel des pièges. La référence [60] reproduite en annexe 6, décrit ces travaux en détail.

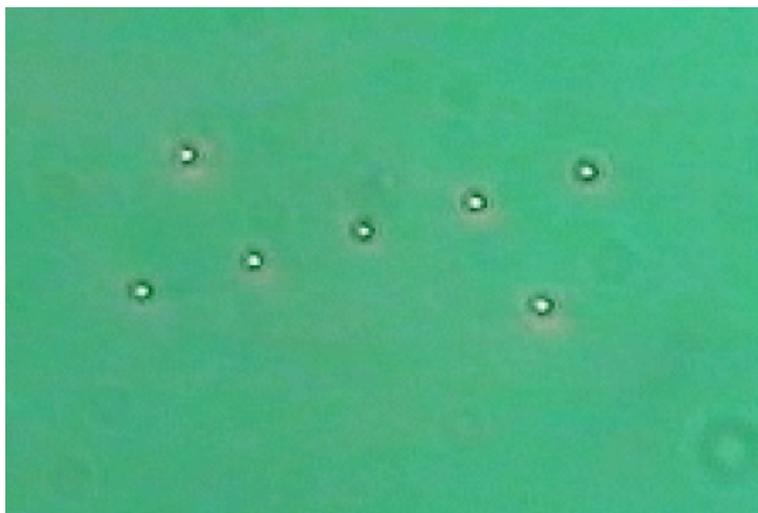


Figure 16: Microsphères de polystyrène prises dans des pièges optiques, générés par MSL et multiplexés temporellement. Les 5 pièges alignés sont fixes, les deux autres sont mobiles.

4.4.6 Commutation de communications optiques

Vers la fin des années 1990, avec le déploiement des technologies d'amplification optique et de WDM (multiplexage en longueur d'onde) et l'explosion de la demande de trafic « internet » le monde des télécommunications optiques a connu une très forte augmentation d'activité. Ceci a mené à d'importants efforts de recherche sur les techniques de commutation optique de signaux de télécommunications. En effet, bien que la technologie de transmission soit devenue presque exclusivement optique, dès que les débits étaient élevés ou les distances de transmission longues, l'aiguillage des signaux dans les noeux du réseau restait électronique. Dans le but d'éviter les conversions optique-électrique et électrique-optique des commutateurs, coûteuses, gourmandes en énergie et formant souvent un goulet d'étranglement sur les débits, de nombreuses propositions de commutation optique des signaux (voir [61] pour une revue) ont vu le jour. Beaucoup des propositions de commutateurs de forte capacité (plusieurs dizaines ou centaines de canaux en entrée et en sortie) utilisaient la possibilité de faire transiter des signaux optiques dans l'espace libre pour effectuer la commutation à l'aide de MSL.

Grâce à son expérience des MSL à cristaux liquide, le département optique de Telecom Bretagne a été un acteur important dans ces recherches [62] [63]. Nous avons notamment fabriqué dans nos propres salles blanches des MSL 1D spécifiquement adaptés aux besoins de la commutation de signaux de télécommunications optiques : optimisation pour l'infra-rouge (1550nm) et opération en modulation de phase. Ces MSL fonctionnent en tant que réseaux de diffraction reconfigurables qui aiguillent les signaux optiques sortant d'une fibre optique vers une (ou plusieurs) fibre(s) d'une barrette de fibres de sortie. Cependant pour pouvoir réaliser des commutateurs de forte capacité avec cette approche, il était nécessaire d'utiliser deux directions de l'espace et donc de disposer d'un modulateur 2D. Or pour obtenir un bon taux de remplissage et un taux de rafraîchissement élevé (important pour les applications en télécommunications optiques) sur un modulateur 2D, la technologie LCOS s'imposait. Nous avons donc profité de nos liens avec CRLOpto pendant mon séjour à Édimbourg pour collaborer avec cet industriel et Optogone, entreprise « start-up » du département optique, afin d'adapter leurs composants (LCOS FLC sur circuit silicium « silicon backplane ») aux besoins de la commutation de signaux de télécommunications optiques.

Lors de mon séjour chez eux j'ai participé et coordonné les trois grandes modifications nécessaires pour adapter les composants standards de CRLOpto:

- changement de l'épaisseur des cellules à CL pour les adapter aux longueurs d'onde des télécommunications optiques, à savoir 1550nm
- changement du CL utilisé dans les cellules pour l'adapter à une modulation binaire de phase
- modification du schéma d'interprétation des données et de leur affichage sur le MSL

Ce dernier point était important car avec les MSL ferro-électriques, pour ne pas orienter les molécules de CL de manière permanente, les signaux électriques appliqués à la cellule doivent inverser leur polarité régulièrement. Dans des applications d'affichage, cela n'est pas un problème majeur vu le temps de commutation très rapide des FLC. On synchronise simplement le MSL avec le système d'illumination pour n'observer le MSL que pendant les phases de polarité correctes, la rémanence de l'œil produisant l'impression visuelle d'une image constante. Pour les applications de commutation optique la situation est tout autre : pour acheminer des signaux optiques de plusieurs Gb/s il est essentiel de garder une image (ici réseau de diffraction) valide à tout moment afin de ne pas perdre d'énormes quantités de données. Nous avons donc développé un schéma d'adressage innovant dit « fenêtre glissante » où, au lieu de changer l'état de tous les pixels du MSL en même temps, nous ne changeons qu'une petite bande à la fois, laissant les autres pixels fixes. Ce schéma, illustré à la figure 17, effectue le passage d'un réseau de diffraction à une version décalée du même réseau. Le montage de diffraction utilisé étant invariant par translation, les deux versions décalés du

réseau diffractent la lumière vers le même fibre de sortie et donc la connexion optique est maintenue à tout moment.



Figure 17: Illustration du schéma d'adressage "fenêtre glissante". A gauche réseau initial, à droite le réseau en cours de modification avec en haut le nouveau réseau décalé, en bas le réseau initial et entre les deux la zone de transition.

Grâce à cette collaboration nous avons pu mettre au point un MSL (1280x1024 pixels) fonctionnant avec une efficacité optique de 65% à 1550nm, et une efficacité de diffraction des réseaux allant jusqu'à 23% avec une pénalité de seulement 1% due au schéma « fenêtre glissante ». Une fois le MSL intégré dans le montage du commutateur optique, nous avons réussi à faire commuter des canaux de transmissions optiques de 2,5Gbit/s avec une pénalité de BER (« Bit Error Rate ») de 0,2dB et un PDL de moins de 1dB. Une description détaillée de ces travaux se trouve à la référence [64] et dans la thèse de Cédric Letort [65] (encadré par B.Fracasso, responsable du projet, mon travail a surtout concerné le MSL).

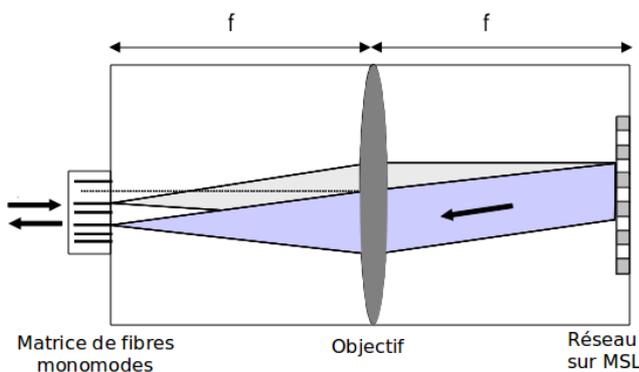


Figure 18: Schéma du montage de commutation de signaux de télécommunications optiques par MSL.

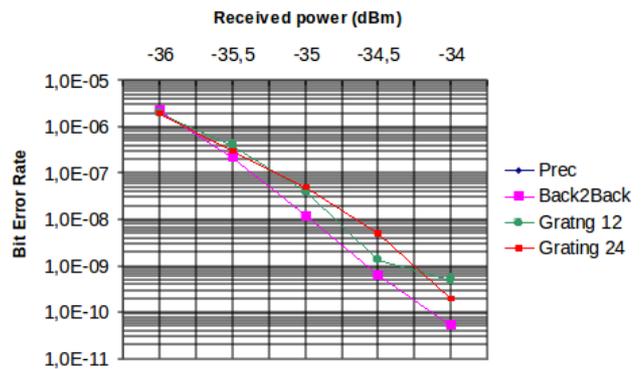


Figure 19: Courbe expérimentale de pénalité de Taux d'Erreur Binaire ("BER") pour le commutateur optique à MSL.

4.4.7 Projet PRINT – phototraçage UV

Notre expérience et savoir faire avec les cristaux liquides et leurs avantages intrinsèques dans les applications qui nous intéressent nous ont fait choisir de préférence cette technologie de MSL quand c'était possible. Cependant il existe des domaines où d'autres technologies sont plus adaptées. Par exemple, dans le domaine du phototraçage massivement parallèle (projet DRAWMAP décrit à la section 5.4.2) quand nous cherchons à réaliser des structures haute résolution (<1µm) ou

dans une grande variété de matériaux photosensibles, le fait de ne pas pouvoir travailler facilement avec les longueurs d'ondes en dessous de 400nm devient rapidement un handicap. Le pouvoir de résolution de tout système d'imagerie optique augmente pour les longueurs d'ondes plus petites d'où la tendance naturelle observée en photolithographie de travailler avec les longueurs d'ondes de plus en plus petites : partant de 436nm l'industrie à évolué vers 365nm, 248nm, 193nm et maintenant 157nm en dessous. De la même manière il existe de nombreux matériaux photosensibles avec des propriétés optiques très intéressantes (par exemple la famille de sol-gels Ormocer [66] pour la fabrication de micro-optiques diffractives et de guides d'onde ou de photorésines haute résolution) qui ne sont photosensibles que dans l'UV.

Pour ces raisons, dans le projet Région Bretagne « PRINT » (détails administratifs en annexe 3) qui visait à étendre les techniques de phototraçage parallèle mises au point dans le projet DRAWMAP décrit au dessus, nous avons décidé de travailler avec un MSL de type DMD de chez Texas Instruments qui permet de moduler des longueurs d'onde dans l'UV jusqu'à 300nm. Puisque les DMD travaillent en réflexion, il n'a pas été possible simplement de remplacer le modulateur LCD du phototraceur DRAWMAP – il a fallu construire de toute pièce un nouveau phototraceur autour du modulateur DMD. L'interface électronique vers notre DMD passant par le port USB (Universal Serial Bus) il a également été nécessaire de modifier le logiciel de pilotage. Ces travaux qui ont fait l'objet de la thèse de Melanie Kessels et se poursuivent dans la thèse de Charbel Nassour, seront décrits en détail dans la section fabrication du chapitre suivant sur les éléments diffractifs et dans la référence [67]. Grâce à ce projet et à l'utilisation du DMD, nous pouvons actuellement étudier expérimentalement la réalisation de structures sub-microniques pour les applications avec des optiques diffractives avec de grands angles de diffraction et l'écriture directe de guides optiques dans les sol-gels et les photopolymères [67].

4.5 Conclusions et futur développements

Dans ce chapitre nous avons pu étudier l'évolution de la technologie des MSL au cours des dernières années et voir comment nous avons pu contribuer à cette évolution surtout au travers de l'application de MSL en dehors du domaine de l'affichage grand public. De l'expérience acquise quelques conclusions générales peuvent être tirées :

- Grâce à leur fabrication à grande échelle pour le marché des vidéoprojecteurs, les technologies de MSL à CL et à DMD (Texas Instruments) sont de loin les plus mûres et les plus performantes. Les autres technologies (ex. à multiples puits quantiques ou miroirs déformables) restent encore des technologies de niche.
- Les modulateurs à CL sont plus adaptés que les DMD pour la modulation de phase – par exemple pour une utilisation en tant qu'EOD reconfigurable.
- Les DMD sont quasi incontournables pour les applications dans l'UV mais les MSL à CL peuvent être très efficaces dans l'IR à condition de pouvoir adapter l'épaisseur des cellules et le mélange CL.
- En pratique, dans beaucoup d'applications, la performance de l'interface électronique (entrée de données) est un facteur déterminant. Un MSL qui semble très performant sur papier ne permet souvent pas d'obtenir des taux de rafraîchissement utiles à hauteur des possibilités et un MSL en théorie moins performant mais avec une interface plus adaptée peut s'avérer plus intéressant en pratique.
- Si possible, il faut chercher des interfaces compatibles avec des cartes vidéo « grand public » afin de profiter au maximum des possibilités des taux de rafraîchissement d'une technologie MSL : les interfaces spécialisés restent chers.
- Pour une utilisation en dehors du domaine visible ou nécessitant une technique d'adressage

spécifique, une relation proche avec un fabricant est presque nécessaire.

En se pliant à ces contraintes nous avons réussi à montrer qu'il est possible d'obtenir (parfois en les adaptant) des MSL performants pour de nombreuses applications en dehors du domaine strict de l'affichage: le phototraçage parallèle, le traitement optique de l'information, la commutation de signaux de télécommunications optiques et les pincettes optiques par exemple.

Pour essayer de prédire les évolutions des technologies MSL dans les années à venir, ces considérations nous indiquent qu'il faut regarder de près le marché des vidéo-projecteurs. Il semble donc raisonnable de s'attendre, grâce à l'appel du marché des vidéo-projecteurs HDTV, à une amélioration continue des MSL pour ces applications vers les pixels plus petits (mais probablement peu en dessous de 10 microns pour des questions de taux de remplissage) et une standardisation vers 1920x1080 pixels (« Full HD »). Une extension vers des nombres de pixels plus grands est possible (on voit déjà apparaître des 1920x1200 par exemple chez [24]) mais incertaine car elle nécessitera la définition et l'acceptation de nouveaux standards alors que le grand public est encore en train de s'équiper en 1920x1080. L'évolution grand public la plus probable après le passage à 1920x1080 pixels semble plutôt être une augmentation des taux de rafraîchissement afin de multiplexer temporellement une image droite et gauche pour le cinéma et la télévision 3D.

Pour plusieurs applications hors-affichage des MSL, ces évolutions se traduiront directement par des performances accrues : plus de pièges dans les pincettes optiques, vitesses et résolutions de tracé plus importantes dans le phototraçage ...

Sur la question des nouvelles applications hors affichage des MSL, il est bien sûr plus difficile de prédire l'avenir. Après beaucoup d'activité dans le début des années 2000 la question des grands commutateurs pour télécommunication optique semble être en suspens. Pour des raisons pragmatiques de coût ce sont plutôt des commutateurs de plus petite taille basés sur des techniques plus simples (mécaniques) qui sont disponibles sur le marché ... ou d'autres approches qui sont privilégiées comme les multiplexeurs optiques à insertion-extraction reconfigurables (« R-OADM »).

La question des interconnexions optiques entre puces ou cartes électroniques est probablement plus prometteuse. Là encore, après beaucoup de recherches dans les années 1980-1990 ce domaine est passé de mode devant la progression constante de l'électronique. Cependant l'évolution vers des processeurs multicoeurs, qui a remplacé récemment la course vers des processeurs à vitesse d'horloge plus rapide, la forte activité de recherche récente chez Intel dans le domaine et l'introduction d'interconnexions optiques commerciales [68] semblent indiquer que les limites des interconnexions électriques, si longtemps prédites par les opticiens semble (enfin !) arriver. Si c'est effectivement le cas cela ouvrira sûrement de nombreuses possibilités de nouvelles applications de MSL.

5 Optique Diffractive Synthétique

5.1 Introduction

Avec les Modulateurs Spatiaux de Lumière décrits dans le chapitre précédent, les Éléments Optiques Diffractifs (EOD) Synthétiques sont le thème central de mes activités de recherche depuis ma thèse de doctorat. C'est aussi le thème que j'ai eu la chance de regarder de la manière la plus complète, abordant au travers de thèses et plusieurs projets de recherche la modélisation, le calcul, la fabrication, la caractérisation, l'application et même la commercialisation de ces éléments. Le but ici n'est pas de faire une présentation exhaustive de ce grand domaine (d'excellents ouvrages le font déjà [69], [70], [71] par exemple) mais de présenter notre contribution sous tous ces aspects. La suite de ce chapitre abordera donc la modélisation et calcul des EOD, les techniques de fabrication les plus courantes, la caractérisation des éléments réalisés et enfin quelques exemples d'éléments que nous avons réalisés pour les applications du département d'optique de Telecom Bretagne mais aussi pour nos partenaires et clients. Tout d'abord, cependant, il est important de clarifier quels types de EOD nous avons étudiés en introduisant quelques définitions : le domaine des EOD est très vaste et pour des raisons expliquées ci dessous nos travaux n'abordent que certains types de EOD.

5.2 Définitions et restrictions

De nombreux termes sont utilisés pour décrire les EOD et malheureusement les définitions de ces termes ne sont pas toujours reconnues universellement. En plus de EOD - Élément Optique Diffractif, (ou DOE - Diffractive Optical Element en anglais), on voit par exemple Optique Binaire (Binary Optic), Kinoforme (Kinoform), HSO - Hologramme Synthétisé par Ordinateur (CGH – Computer Generated Hologram), EOH – Élément Optique Holographique (HOE – Holographic Optical Element) et même tout simplement « Hologramme » ou « micro-optique » ou « micro-optique diffractive ». Si certains de ces termes sont clairs – un kinoforme est toujours un objet de phase pur par exemple – d'autres sont plus ambigus : une lentille de Fresnel de petite taille (<1mm) et multi-niveaux de phase est-il une micro-optique réfractive ou diffractive par exemple ?

Dans ce qui suit nous utiliserons Élément Optique Diffractif (EOD) comme terme général pour couvrir toute la famille d'éléments que nous étudions car tous utilisent la diffraction de la lumière d'une manière ou une autre. Plus strictement on pourrait rajouter « Synthétique » (EODS) car tous les éléments que nous traiterons seront modélisés par ordinateur pour produire des fichiers qui serviront à fabriquer les éléments physiques par les techniques de la micro-lithographie. Cependant le terme EODS étant très peu utilisé dans le domaine, par simplicité nous dirons EOD. Historiquement, dans la littérature scientifique nous voyons souvent le terme Hologramme Synthétisé par Ordinateur (HSO), cependant l'apparition plus récente de l'holographie numérique (« Digital Holography ») où l'on enregistre une figure d'interférence sur un capteur électronique (caméra CCD ou CMOS) porte maintenant à confusion. Nous éviterons alors ce terme pourtant assez bien adapté.

Comme expliqué ci dessus, le type de EOD que nous étudions ici est restreint aux éléments, illustrés à la figure 20, c'est à dire calculés par ordinateur et réalisés de manière synthétique (par opposition à ceux, tels les EOH, réalisés par l'enregistrement d'interférences). De plus pour des raisons liées aux difficultés et coûts à la fois de la modélisation, de la fabrication et de la caractérisation structurelle d'EOD comportant des motifs approchant la longueur d'onde d'utilisation, nous nous sommes intéressés surtout aux EOD dans le régime scalaire de diffraction. Ce choix réduit quelque peu les fonctions optiques réalisables et donc également le domaine des

applications mais en pratique ces restrictions sont faibles. Dans le régime scalaire, les possibilités de génération de fronts d'ondes restent vastes (et souvent plus variés que le régime vectoriel de la diffraction pour lequel on a du mal à modéliser des structures complexes) et permettent en conséquence de répondre aux besoins d'un très grand nombre d'applications. Plus pragmatiquement, si la taille des motifs à réaliser est plus grande qu'un micron, la fabrication (photo-lithographie en UV proche) et la caractérisation structurelle (microscopie optique vs microscopie électronique) se trouvent fortement facilitées et restent donc à la portée des laboratoires académiques.

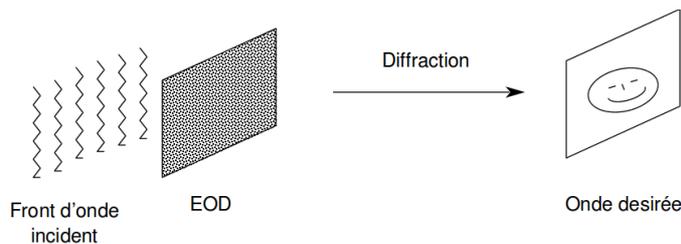


Figure 20: Schéma de fonctionnement d'un EOD

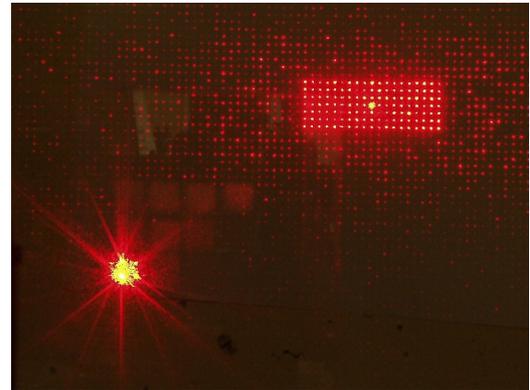


Figure 21: Image expérimentale d'un EOD illuminé par un faisceau laser et sa figure de diffraction

5.3 Modélisation et calcul

5.3.1 Régimes de diffraction

La diffraction de la lumière par des structures de taille approchant celle de la longueur d'onde est connue depuis longtemps. Plusieurs niveaux de modélisation existent. Au niveau le plus général se trouve l'approche électromagnétique (EM) complète, basée sur la solution des équations de Maxwell dans le milieu de propagation et sur (ou dans) les objets diffractants. Cette approche est parfois appelé « théorie rigoureuse de la diffraction », ou, puisqu'il tient compte de la nature vectoriel du champ EM (et donc de la polarisation de l'onde lumineuse), la théorie vectoriel. La formulation probablement la plus connue est celle de Rayleigh-Sommerfield dont on trouvera une présentation dans [72]. Cependant, la complexité de cette approche la limite à la modélisation des EOD relativement simples comme des réseau ou des lentilles (voir [73] et [74]). A un niveau un peu plus simple on retrouve la modélisation de Kirchoff qui traite la lumière comme une onde scalaire avec une amplitude et une phase mais qui ne tient pas compte de la polarisation. Il se résume dans la formule de Fresnel-Kirchoff ci dessous qui décrit l'amplitude complexe (U) de l'onde lumineuse en un point P derrière un écran Σ résultant d'un point source en P_0 (λ est la longueur d'onde, k le vecteur d'onde, A une constante, les autres termes sont visibles sur la figure 22).

$$U(P) = \frac{A}{j\lambda} \iint_{\Sigma} \frac{e^{jk(r+s)}}{rs} [\cos(n,r) - \cos(n,s)] d\Sigma \quad (1)$$

Cette modélisation est valide tant que les distances source-écran et écran-point P sont nettement plus grandes que la longueur d'onde (voir [72] ou [75] pour plus de précisions sur le domaine de validité). Noter qu'elle reste une bonne approximation même pour des structures dont la taille est proche de la longueur d'onde. Son inconvénient pour nos besoins est que l'effort de calcul (numérique) pour un EOD synthétique de taille raisonnable reste important et donc limitant.

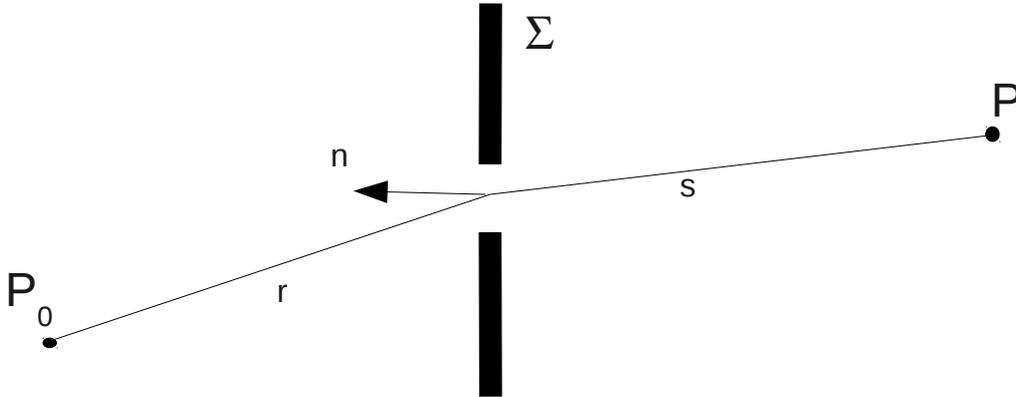


Figure 22: Illustration de la diffraction en régime de Kirchoff

La modélisation la plus utilisée en pratique pour le calcul d'EOD synthétiques est la diffraction de Fresnel-Fourier, modélisation scalaire comme celle de Kirchoff mais qui, de plus, suppose que les dimensions des structures diffractantes sont bien supérieures à la longueur d'onde et suppose aussi que la distance de diffraction (z) est nettement plus grand que les dimensions transverses (x_1 et y_1) de l'obstacle diffractant (on trouvera une discussion plus précise des approximations dans [75]). Ces limitations permettent de simplifier l'intégrale de la formule de Fresnel-Kirchoff pour donner:

$$U(x_0, y_0) = \frac{e^{jkz}}{j\lambda z} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} U(x_1, y_1) e^{\frac{jk}{2z}[(x_0 - x_1)^2 + (y_0 - y_1)^2]} dx_1 dy_1 \quad (2)$$

correspondant au champ diffracté dans le plan (x_0, y_0) à une distance z derrière une champ lumineuse $U(x_1, y_1)$ comme illustré à la figure 23. Pour une diffraction à l'infini on retrouve la relation, encore plus simple, de la diffraction de Fraunhofer.

$$U(x_0, y_0) = \frac{e^{jkz}}{j\lambda z} e^{\frac{jk}{2z}(x_0^2 + y_0^2)} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} U(x_1, y_1) e^{\frac{-j2\pi}{\lambda z}(x_0 x_1 + y_0 y_1)} dx_1 dy_1 \quad (3)$$

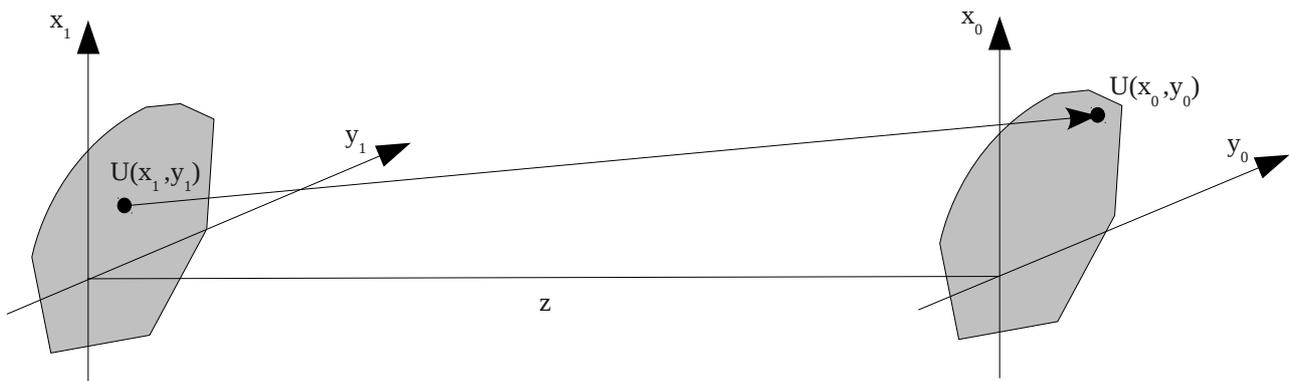


Figure 23: Illustration schématique de la diffraction en régime de Fresnel

L'avantage de cette modélisation est que, hormis la phase quadratique devant l'intégrale qui ne sera pas visible sur les détecteurs énergétiques, elle se réduit à une simple Transformée de Fourier (TF). Or il existe des algorithmes numériques accélérés très performants pour le calcul de Transformées de Fourier (algorithmes dits FFT « Fast Fourier Transform » [76]). Avec ces algorithmes il devient possible de calculer des EOD synthétiques de grande taille (plusieurs millions de pixels), réalisant des fonctions optiques complexes avec un effort de calcul acceptable. De plus la restriction à la diffraction de Fraunhofer n'est en fait pas une, car la relation à l'équation 3 peut se mettre sous la forme [75] d'une TF avec multiplication par des termes de phase quadratiques avant et après la Transformée. On peut ainsi profiter des algorithmes de TF rapides pour calculer les EOD dans toute le domaine de la diffraction de Fresnel. (La formulation fractionnaire [77] de la diffraction en régime de Fresnel rend ce lien particulièrement évident).

Il est important de noter qu'en pratique, les restrictions du régime de Fresnel ne sont que peu gênantes car elles correspondent bien aux contraintes technologiques présentés en introduction: structures avec des motifs de taille minimale de quelques microns, donc quelques multiples de la longueur d'onde qui ne diffractent que par des angles de moins de 10° environs.

5.3.2 Besoin de codage de EOD synthétiques

Maintenant que le régime de modélisation est défini, nous pouvons aborder les algorithmes de calcul des EOD. Le but d'un algorithme de calcul d'un EOD synthétique est de trouver une structure (2D) qui diffracte un front d'onde incident connu en un front d'onde désiré dans un plan donné. Par exemple qui transforme une onde plane en une matrice de points lumineux ou qui met en forme un faisceau laser pour faciliter son injection dans un guide d'onde. On part typiquement de l'onde désirée (cible) sous forme échantillonnée et on effectue (dans l'ordinateur) une Transformée de Fourier (ou Fresnel) inverse pour connaître l'amplitude complexe qu'il faut réaliser physiquement. De manière générale cela donne une fonction (échantillonnée) complexe – avec amplitude et phase. Or, on ne sait réaliser facilement que des fonctions d'amplitude (transparence en niveaux de gris) ou de phase (ex. plaque de verre gravé pour donner une épaisseur optique qui varie spatialement). De plus, en pratique, le nombre de niveaux de gris ou de phase sont souvent limités par la technologie de fabrication. En particulier, on cherche souvent à fabriquer des EOD de phase pure, beaucoup plus efficaces en termes d'énergie car non absorbant. Donc au lieu de fabriquer un élément avec l'amplitude complexe calculée, on ne peut fabriquer en pratique qu'une version approchée. Si l'on ne prend pas plus de précautions, l'erreur de quantification de l'amplitude complexe ainsi introduite résulte en une image de reconstruction (front d'onde diffracté) fortement bruitée, comme l'on peut voir à la figure 24.

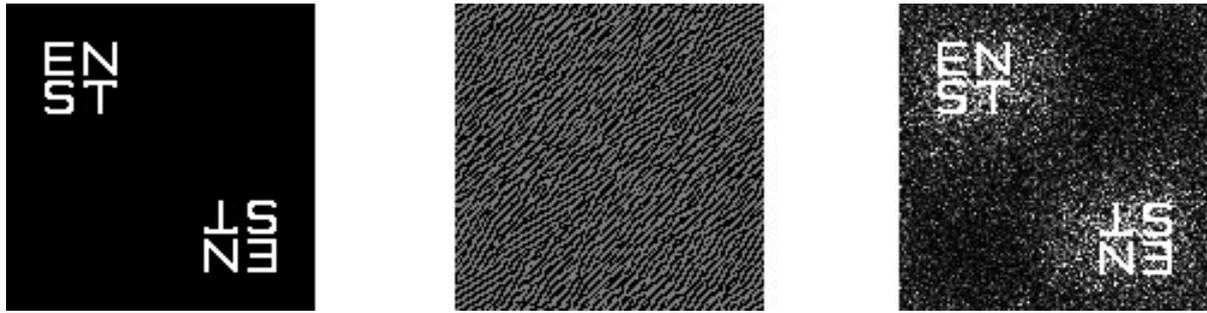


Figure 24: A gauche, image cible, Au centre, l'EOD obtenu par binarisation directe. A droite, front d'onde de sortie bruité.

Pour cette raison, les chercheurs dans le domaine ont développé de nombreux algorithmes d'optimisation d'EOD qui utilisent des *degrés de liberté* [78] dans le calcul pour réduire l'erreur de quantification ou son effet nuisible. Les degrés de liberté les plus utilisés sont:

Phase de la reconstruction: dans beaucoup d'applications seule l'éclairement (module au carré de l'amplitude complexe) de l'onde diffractée est important. On peut donc choisir la phase de l'onde diffractée comme on le veut. Avec un choix judicieux de la phase de l'onde de sortie on peut réduire l'erreur de quantification de l'EOD.

Fenêtre utile: on n'impose pas d'obtenir le front d'onde désiré dans tout le plan de sortie, mais seulement une partie (la fenêtre utile – voir figure 25), laissant les autres zones libres pour le bruit.

Efficacité de diffraction: on n'impose pas que toute la lumière incidente soit diffracté dans l'image cible, on accepte un niveau de sortie plus bas que l'optimale.

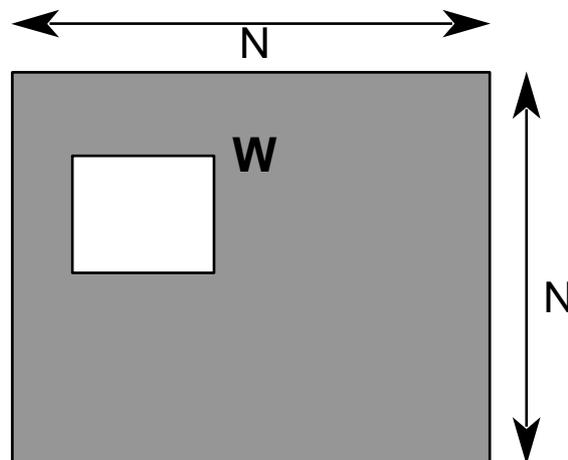


Figure 25: Fenêtre utile (W) dans le plan de sortie d'un EOD de $N \times N$ pixels

Avant d'aborder les principales familles d'algorithme de calcul de EOD synthétiques et notre contribution à leur mise au point, il est important de rappeler les critères de qualité d'un EOD qui permettent de comparer les algorithmes.

L'*efficacité de diffraction* est la proportion de l'énergie de la lumière incidente sur l'EOD qui est diffractée dans l'image désirée. La définition la plus courante est:

$$\text{Efficacité de diffraction} = \frac{\sum_W |b|^2}{\sum_{0 \rightarrow N^2} |b|^2} \quad (4)$$

où $b(i,j)$ est l'amplitude complexe échantillonnée dans le plan de sortie d'un EOD quantifié de $N \times N$ pixels ($i, j : 0 \rightarrow N$) et W est la fenêtre utile.

Il y a plusieurs définitions de l'*erreur de reconstruction* ou fidélité de reconstruction selon l'application précise (selon si on recherche en sortie une amplitude complexe ou un éclaircissement par exemple). Cependant il prend souvent une forme du type

$$\text{Erreur} = \sum_W \left| |h|^2 - \lambda |b|^2 \right| \quad (5)$$

où h représente le front d'onde cible, b le front d'onde produit par l'EOD quantifié et λ est un facteur de normalisation qui tient compte de l'efficacité de diffraction.

Enfin le dernier critère est l'*effort de calcul*, souvent évalué en comparant le temps de calcul des différents algorithmes pour un même EOD sur un même ordinateur, ou en considérant la dépendance du nombre d'opérations de calcul sur N , le nombre de pixels dans le EOD.

5.3.3 Les algorithmes de calcul de EOD synthétiques

Recherche Binaire Directe (RBD ou DBS = « Direct Binary Search »)

La recherche binaire directe [79] part de l'idée que pour les EOD les plus faciles à réaliser (binaire de phase ou d'amplitude) chaque pixel ne peut prendre que deux états, transparent ou opaque (ou phase 0 ou π). On initialise donc l'EOD avec une distribution aléatoire de pixels, et on calcule la TF pour obtenir la reconstruction que l'on compare à la cible. Ensuite on inverse l'état d'un des pixels du EOD, on calcule la nouvelle reconstruction que l'on compare à la précédente. Si l'inversion du pixel améliore la reconstruction (erreur et/ou efficacité de diffraction), on l'accepte, sinon on revient à l'état initial du pixel. L'algorithme répète la procédure sur les pixels suivants et continue jusqu'à ce qu'aucun pixel du EOD ne soit inversé. Cet algorithme donne des EOD très performants mais avec un coût de calcul important qui, malgré des versions accélérées [80] limite son application à des EOD avec relativement peu de pixels (typiquement $< 10^7$).

Un autre inconvénient de cet algorithme est qu'il ne trouve pas forcément la solution optimale globale car il peut rester piégé dans un minimum local (il n'inverse jamais deux pixels à la fois par exemple [81]). L'algorithme de recuit simulé [82] est une extension qui cherche à éviter ces minima locaux en acceptant des inversions qui, par exemple, augmentent l'erreur de reconstruction, mais en les acceptant avec une probabilité qui décroît dans le temps. L'approche est efficace, mais son inconvénient est un effort de calcul encore plus grand.

Diffusion d'erreur (DE)

La diffusion d'erreur [83] est une technique (emprunté de l'imprimerie) où l'on transfère l'erreur de quantification commise en quantifiant un pixel aux pixels voisins qui n'ont pas encore été quantifiés. Lors de la quantification de ces pixels voisins on tient compte de l'erreur transmise, le « corrigeant ». En diffusant l'erreur aux pixels voisins, avec des bons coefficients pour répartir

l'erreur en différentes directions, il est possible de contrôler la position des « nuages » de bruit de quantification dans le plan de sortie et de les éloigner de la fenêtre utile (voir figures 26 et 27). Le grand avantage de ces algorithmes est leur rapidité, un seul passage sur les pixels de EOD suffit pour le quantifier donc ils peuvent s'appliquer à des EOD de grande taille, qu'il serait impossible de calculer en un temps raisonnable avec la technique de RBD par exemple. En contrepartie, leur performance en termes d'efficacité de diffraction et erreur de reconstruction n'atteint pas celle des méthodes itératives.

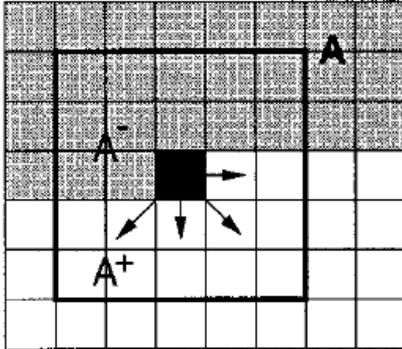


Figure 26: Coefficients directionnelles de la diffusion de l'erreur de quantification.

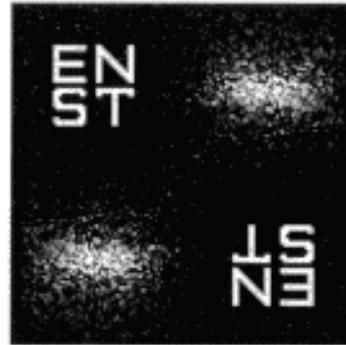


Figure 27: Exemple d'image de sortie pour un EOD calculé par diffusion d'erreur

Bien que les algorithmes de diffusion d'erreur fussent souvent utilisés dans le domaine, le lien précis [84] [85] [86] [87] [88] [89] entre des coefficients de diffusion de l'erreur dans le plan du EOD et la position du bruit dans le plan de sortie n'était pas entièrement compris. Nous avons réussi à démontrer ([90] reproduite en annexe) que le tableau des coefficients de diffusion de l'erreur devrait être la transformée de Fourier de la fonction de la fenêtre utile (voir figure 28). Avec des poids de diffusion de cette forme, il devient possible d'enlever le bruit de la fenêtre signal à la manière des méthodes itératives comme la RBD. Dans une deuxième publication [91] nous avons étendu l'approche à des EOD à plusieurs niveaux de phase à l'aide de coefficients de diffusion complexes.

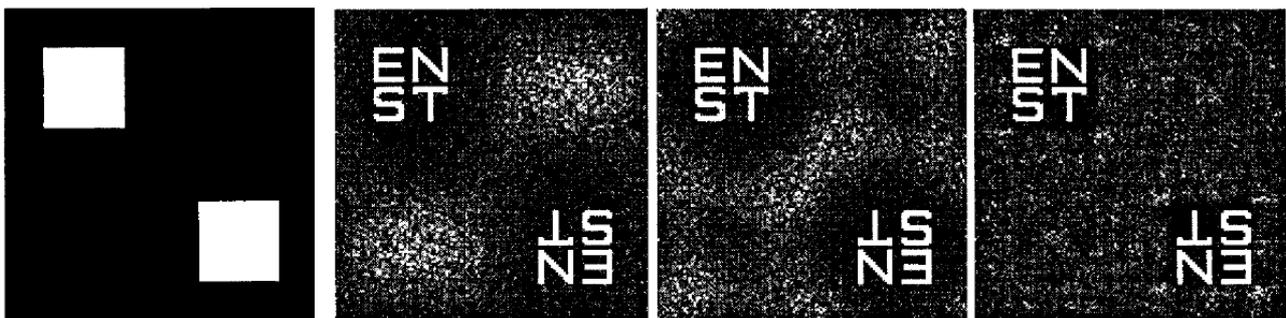


Figure 28: De gauche à droit : fonction de la fenêtre utile puis 3 plans de sortie de EOD obtenus avec 4, 8 et 96 poids de diffusion.

Transformée de Fourier Itérative (IFTA – « Iterative Fourier Transform Algorithm »)

Les algorithmes de transformé de Fourier Itératives, schématisés à la figure 29 ont été appliqués au calcul des EOD sous plusieurs noms, par plusieurs équipes et avec de nombreuses variantes [92] [93] [94] [95]. L'algorithme part habituellement du front d'onde cible, calcule la TF pour arriver dans le domaine de l'EOD. Là, il applique les contraintes de quantification (ex. EOD de phase pure, quantification des niveaux) avant de faire la TF inverse pour retrouver le domaine du

plan de sortie. Ensuite il applique les contraintes de fidélité à l'image cible désirée, remplaçant par exemple l'amplitude de la cible bruitée dans la fenêtre utile mais en laissant sa phase libre et en laissant le bruit apparaître ailleurs dans le plan de sortie. Ensuite il prend la TF de ce nouveau plan de sortie pour obtenir une nouvelle estimation de l'EOD. L'algorithme itère ainsi entre les domaines de sortie (cible) et de l'EOD, appliquant les contraintes correspondantes dans chaque domaine. Si les contraintes sont correctement paramétrées et surtout introduites progressivement [78], l'algorithme converge vers des EOD avec d'excellentes performances (aussi bien que la RBD) avec un effort de calcul intermédiaire entre le RBD et la DE.

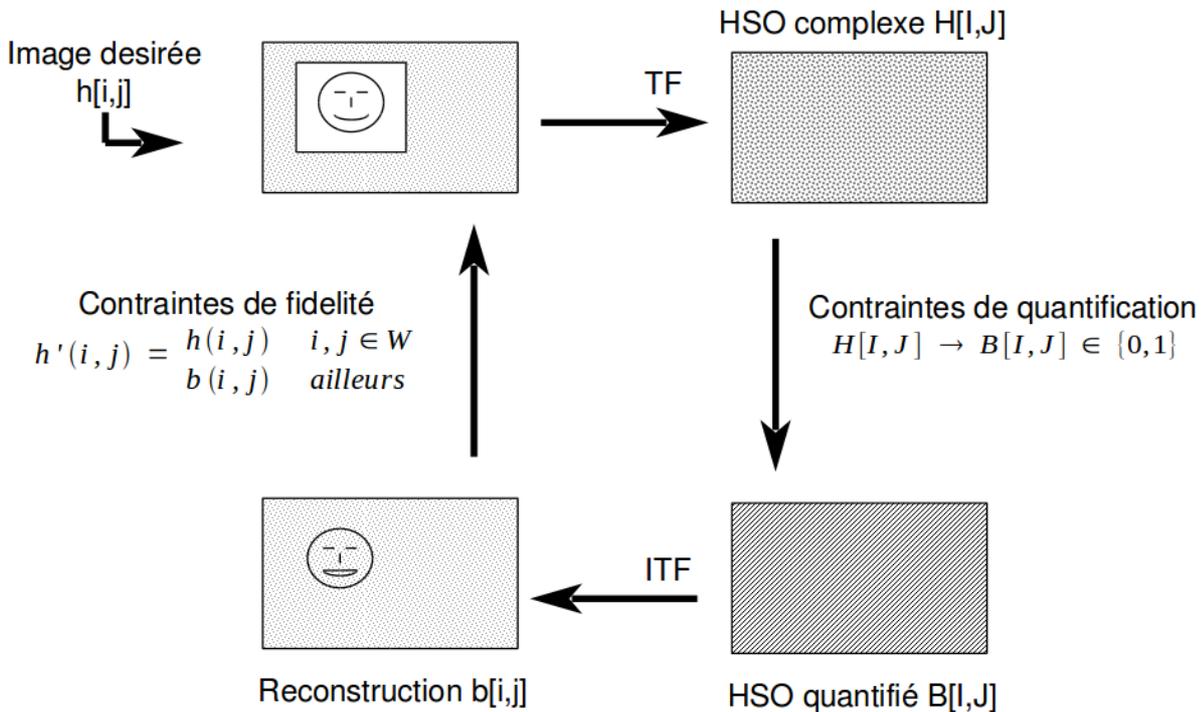


Figure 29: Schéma de l'algorithme de transformée de Fourier itérative

Autres algorithmes ... Génétiques et Neuronaux

Des présentations précédentes, il ressort que la question du calcul d'un EOD est essentiellement un problème d'optimisation sous contraintes. On a donc vu plusieurs algorithmes et techniques plus généraux d'optimisation sous contrainte appliqués avec succès au calcul de EOD, comme les algorithmes dits génétiques [96] [97] et neuronaux [98] dont certains ont la particularité de faire l'optimisation directement dans le domaine de l'EOD pour essayer d'éviter le coût en calcul des Transformées de Fourier.

Solutions analytiques

Dans certains cas particuliers, par exemple la transformation d'un faisceau à profil gaussien en un profil créneau (« top hat ») [99] ou pour d'autres formes géométriques simples [100], il existe des solutions analytiques pour la fonction de phase du EOD. (Ce type d'approche est souvent utilisé pour la transformation de faisceaux lasers – voir [101] pour plus de détails sur cette application importante). De même pour certaines fonctions optiques à une dimension, par exemple la formation d'une ligne de points (le cas très connu des réseaux de Dammann [102]), il existe des solutions exactes qu'on peut approcher en appliquant des méthodes d'optimisation classiques tels Newton-

Raphson. Cependant, dans la pratique, puisque ces solutions ne tiennent pas compte de la facilité de fabrication de l'EOD (par exemple le fait qu'avec une technique de fabrication donné on ne peut réaliser que 8 niveaux de phase dans un EOD), souvent les EOD obtenus ont des performances réelles en dessous de celles calculées par les algorithmes d'optimisation qui peuvent tenir compte des contraintes de fabrication pendant l'optimisation.

Comparaison pratique des algorithmes de calcul des EOD

De la remarque ci-dessus, nous voyons que le choix d'un algorithme de calcul d'un EOD est en pratique, moins simple qu'il peut apparaître au premier abord. Au département optique de Telecom Bretagne nous avons implémenté et testé pratiquement tous les algorithmes cités ci dessus et nous avons constaté que les algorithmes qui donnent souvent les EOD physiques les plus performants ne sont pas ceux qui, sur le papier ou en simulation, ont les meilleures performances. La raison principale est que toute méthode de fabrication d'EOD a ses propres contraintes et limitations (voir section 5.4) et que si on n'en tient pas compte pendant le calcul ([103], [104], [105], [106]) alors les résultats pratiques avec l'EOD physique sont souvent bien en dessous de ceux attendus.

Notre expérience est que les algorithmes de Diffusion d'Erreur ne sont adaptés qu'au calcul de très « grands » EOD (produit espace bande ou SBWP « Space Bandwidth Product ») ... et même dans ces cas, avec la progression des moyens de calcul, on peut de plus en plus souvent utiliser des algorithmes itératifs plus performants. Pour les autres applications, c'est la famille IFTA qui est plus adapté car elle offre le meilleur compromis performance/effort de calcul. D'autres algorithmes (RBD, génétiques ...) donnent certes des solutions EOD très performantes mais avec un coût de calcul qui limite la taille des EOD et qui rend souvent plus difficile la prise en compte des contraintes de fabrication. Avec un algorithme IFTA optimisé ([107], [108]), correctement initialisé [109] et où l'on impose des contraintes progressivement, on obtient en pratique des résultats tout à fait comparables aux algorithmes les plus performants [110]. Enfin, l'autre atout majeur de ce type d'algorithme est que quand le nombre de niveaux de phase augmente (grâce aux possibilités offertes par les techniques de fabrication modernes, section 5.4) là où le temps de calcul de l'algorithme RBD se détériore car il faut tester de plus en plus de configurations possibles de chaque pixel, la performance de l'IFTA s'améliore : sa convergence est plus rapide car les contraintes de quantification moins fortes. En conséquence, les algorithmes à base d'IFTA sont devenus nos algorithmes de choix dans la grande majorité des applications

5.4 Fabrication

Pour fabriquer un EOD synthétique il faut réaliser un objet qui module spatialement l'amplitude et/ou la phase d'une onde lumineuse de manière à provoquer la diffraction. Donc, en pratique, dans le spectre visible, un EOD doit comporter des motifs avec des dimensions de quelques microns pour produire une diffraction importante de l'onde incidente. Historiquement, les premiers EOD synthétiques [111] étaient des masques d'amplitude car plus faciles à fabriquer (par exemple une émulsion photographique). Rapidement, cependant, on a cherché à fabriquer des EOD de phase beaucoup plus performants en termes d'efficacité de diffraction [69]. S'il est possible de moduler la phase par une variation locale de l'indice de réfraction comme pour une lentille à gradient d'indice, en dehors des MSL et des EOD reconfigurables, on obtient des EOD synthétiques de phase presque exclusivement par une modulation de l'épaisseur de l'élément. Encore une fois, le but ici n'est pas de refaire une étude détaillée des techniques de fabrication des EOD (qui se trouve dans [69] ou [70]

par exemple), nous n'aborderons donc que les deux grandes familles de techniques de fabrication, par masquage et écriture directe, afin de situer notre travail dans son contexte et souligner notre apport.

5.4.1 Masquage photo-lithographique

Cette technique bénéficie de la maturité des technologies photolithographiques de fabrication de circuit intégrés. Un masque binaire, typiquement chrome sur substrat de verre/silice est réalisé à partir de fichiers calculés par des algorithmes de modélisation (section 5.3.3) à l'aide d'un faisceau laser ou faisceau d'électrons, comme pour un masque de circuit intégré. Ce masque peut-être utilisé directement en tant qu'EOD binaire d'amplitude ou, après une copie contacte ou par projection, transformé en EOD de phase par une étape de gravure (typiquement gravure par plasma ionique – RIE « Reactive Ion Etching ») du substrat comme indiqué schématiquement à la figure 30. En répétant le processus, il est possible de réaliser des EOD à plusieurs niveaux de phase (2^N niveau avec N étapes de masquage) plus performants, à condition de bien aligner les masques à chaque étape.

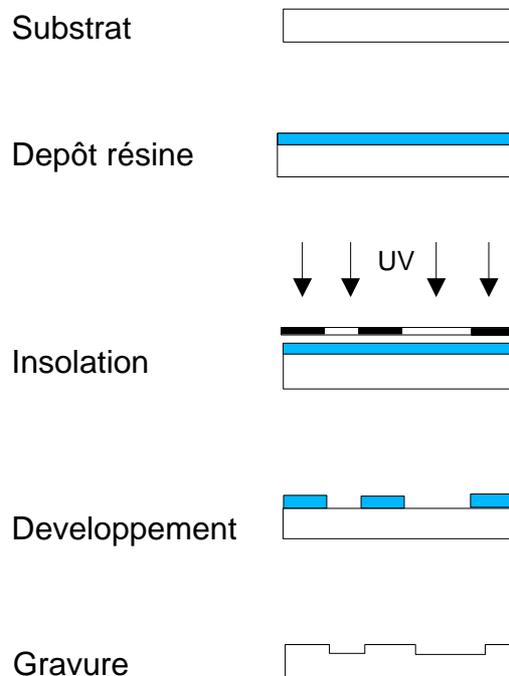


Figure 30: Fabrication d'un EOD binaire de phase par masquage

J'ai pu me familiariser avec cette approche, d'abord pendant ma thèse lors de mon séjour au Technion à Haifa en Israël où j'ai pu avoir accès à une machine d'ablation laser, destinée à la réalisation de circuits ASICs (« Application Specific Integrated Circuits »). Pendant cette collaboration nous avons réussi à adapter notre calcul de EOD au format de fichier du phototraceur (adapté à l'industrie micro-électronique) et réaliser les EOD binaires d'amplitude (chrome sur verre) qui ont servi de module d'entrée [112] (matrice de microlentilles diffractives) et de matrice d'interconnexion [48] dans le dispositif expérimental de ma thèse [47]. Plus tard, pendant mon premier « Post-doc » j'ai pu me familiariser avec l'écriture de masques par faisceau d'électron quand j'ai adapté (format échantillonné « bitmap » vers un format vectoriel) mes programmes de calcul de EOD à la machine de fabrication de masques de nos partenaires au Centre National des Recherches

en Télécommunications de Bagneux. Par une étape de gravure RIE les masques ont été convertis en DOE binaires de phase, améliorant fortement le rendement énergétique de notre montage. Ces travaux nous ont également permis de mettre en évidence deux améliorations dans le calcul des EOD d'interconnexion en jouant sur la phase de l'image produite dans le plan de sortie [9].

Pendant ces expérimentations, les avantages et inconvénients de la fabrication d'EOD par masquage sont devenus clairs. C'est une technique maîtrisée qui permet de réaliser des EOD performants (efficacité de diffraction, résolution, taille, matériaux ...), qui est particulièrement adaptée à la production de grandes séries d'EOD. Cependant pour la production de EOD prototypes elle est chère et lente. Si on utilise ces masques lithographiques pour fabriquer (par copie projection) de grandes séries de EOD, leur coût initial est rapidement amorti, mais pour le prototypage, où l'on a besoin que de quelques exemplaires ou, pire, de plusieurs variantes, il faut réaliser un jeu de masques pour chaque élément et le coût devient rapidement prohibitif.

Grâce à cette expérience, quand le département optique de Telecom Bretagne a décidé de se doter de ses propres moyens de fabrication de EOD, j'ai été nommé responsable de la mise en place de la salle blanche et la chaîne de fabrication. En tant que laboratoire de recherche, nous étions intéressés naturellement par une technique de fabrication adaptée au prototypage. C'est pour cela que nous avons évité les phototraceurs à faisceau laser et électrons relativement lents et surtout chers tant à l'achat qu'en fonctionnement, pour nous tourner vers un phototraçage rapide (Mivatec 1648) de films moyenne résolution suivi d'une photoréduction « haute résolution » (Photo-répéteur David Mann) illustrée aux figures Erreur : source de la référence non trouvée et 31. Bien que la résolution finale des EOD obtenus par cette technique de fabrication fût relativement modeste ($\sim 2 \mu\text{m}$), elle correspondait bien à nos besoins car comme indiqué plus haut nous nous sommes restreints aux EOD dans le régime scalaire. L'approche présentait surtout deux grands avantages. D'abord une fabrication très rapide : quelques minutes pour tracer un film avec une résolution d'environ $20 \mu\text{m}$ et quelques minutes pour la photoréduction. Ensuite un faible coût : quelques euros pour le film et surtout la possibilité de réaliser des EOD de phase directement par photoréduction dans une couche de photorésine sur un substrat de verre, évitant le coût (et la copie) d'un masque en chrome et facilitant la réutilisation de substrats par simple nettoyage à l'alcool ou à l'acétone. A l'aide d'un aligneur de masques MJB3 de Karl Suss nous sommes également arrivés à fabriquer des EOD à plusieurs niveau de phase [113]. Ces moyens ont servi à la fabrication de nombreuses EOD pour notre laboratoire (notamment dans le cadre des thèses de Yves Defosse [114] et Eric Quertemont [115]) et pour nos partenaires. Nous verrons quelques exemples de réalisation à la section 5.6 .



Figure Erreur : source de la référence non trouvée :
Phototraceur Mivatec 1648 dans la salle blanche
EOD du département optique



Figure 31: Photo-répéteur David Mann du
département optique

5.4.2 Écriture Directe

Devant le coût et la lenteur des techniques de fabrication de EOD prototypes par masquage, comme nous, d'autres laboratoires et industriels ont recherché des techniques alternatives. Celle qui offre le plus d'avantages pour le prototypage est probablement la technique dite « écriture directe » qui utilise un faisceau modulé pour balayer un substrat et y inscrire les motifs d'un EOD. Le plus souvent on utilise un faisceau laser ou d'électrons pour inscrire les motifs dans une couche de photorésine, mais il est également possible d'utiliser un laser puissant pulsé (par exemple un laser Excimer) ou un faisceau d'ions (FIB ou « Focused Ion Beam ») pour usiner le substrat directement. (Pour une revue de ces techniques voir par exemple le chapitre 4 du livre [69]).

Les avantages de l'écriture directe sont nombreux:

- il évite le temps et le coût de fabrication et de copie des masques
- il permet (avec des systèmes de phototraçage plus sophistiqués qui modulent le faisceau analogiquement) la fabrication directe de EOD multi-niveaux de phase et même phase continue, sans les problèmes d'alignement successifs de masques
- pour une inscription dans une couche de photorésine, il permet la réutilisation de substrats

Ses inconvénients sont:

- la lenteur de fabrication: on expose les pixels du EOD un par un successivement là où une copie de masque écrit tout le EOD en une exposition unique.
- un compromis temps de fabrication/résolution : pour réaliser des EOD haute résolution il faut un faisceau avec une tache focale petite ($<1\mu\text{m}$) mais en conséquence on doit introduire une grille de balayage plus serrée (typiquement entre $\frac{1}{2}$ et $\frac{1}{10}$ de la taille de la tache focale) pour éviter une rugosité de surface du EOD qui le rend diffusant et donc réduit l'efficacité de diffraction. Pour des EOD de grande taille et à haute résolution on se retrouve parfois avec des temps de tracé dépassant la dizaine d'heures.
- une inadaptation à la fabrication de série – même temps de fabrication pour chaque élément. La technique de recopie par nanoembossage (« nanoimprint ») décrit à la section 5.4.3 est maintenant un excellent remède à cet inconvénient.

Notre travail avec le phototraceur rapide de film de chez Mivatec GmbH nous a cependant suggéré une autre technique possible qui permettait de garder les avantages de l'écriture directe et la rapidité de l'insolation simultanée de grandes surfaces de la technique de masquage. Le phototraceur de Mivatec était basé sur l'imagerie d'un CRT sur un film qui permettait l'écriture simultanée de surfaces de dizaines de milliers de pixels – écriture massivement parallèle. Apportant notre expérience avec les MSL, nous avons travaillé avec Mivatec dans le cadre de la thèse de Marwa Elbouz, sur l'utilisation, dans un premier temps, de leur machine pour l'écriture directe en photorésine. Au vu des résultats encourageants nous avons proposé et obtenu le projet européen DRAWMAP, que j'ai dirigé (« prime »), sur l'extension de cette technique vers le phototraçage haute-résolution (quelques mm), de grandes surfaces (imprimerie « offset ») et l'utilisation de MSL à CL en remplacement des CRT insuffisamment lumineuses. Le schéma de principe de cette technique est montré à la figure 32 et la figure 33 montre une vue du phototraceur à haute résolution DRAWMAP dans nos salles blanches.

Pour réaliser notre phototraceur haute résolution DRAWMAP, il nous est rapidement apparu que la

façon la plus efficace était de récupérer un photorépéteur (stepper) de l'industrie de la fabrication micro-électronique. On pouvait bénéficier ainsi d'une optique de projection très performante (résolution, distorsion ...), d'un mécanisme robuste et stable, de bonnes platines de translation (contrôle interférométrique répétabilité <100nm sur 15x15cm), du système d'autofocus et un bloc d'illumination très uniforme (variations sur le champ utile ~1%). De plus, industrie microélectronique passait à ce moment des photorépéteurs « g-line » (436nm) au photorépéteurs « i-line » (365nm) et 248nm donc il existait sur le marché d'occasion de nombreux photorépéteurs optimisés pour le 436nm donc parfaitement adaptés aux MSL à CL. Sur cette base nous avons donc remplacé le masque de projection par un MSL à CL (décrit à la section 4.4.3) et surtout adapté l'électronique de pilotage pour permettre un contrôle de l'ensemble par PC moderne ... il est loin d'être trivial de faire coexister des interfaces compatibles avec l'électronique des années 1980 et les cartes graphiques récentes.

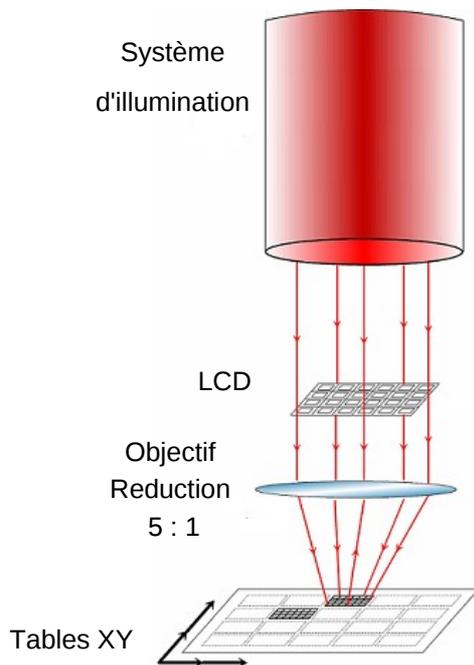


Figure 32: Schéma de principe du phototraceur parallèle "DRAWMAP"



Figure 33: Phototraceur "DRAWMAP" basé sur un MSL à CL

Ensuite nous avons développé des techniques de phototraçage propres à cette approche originale de l'écriture directe. Tout d'abord, pour pouvoir fabriquer des EOD plus grands que la taille du MSL photoréduit (objectif de réduction 1:5), nous avons découpé le fichier EOD en blocs de la taille du MSL et utilisé les platines de translation pour raccorder ces blocs ensemble. Ensuite nous avons mis au point une technique de « sur-résolution » où on effectue des micro-déplacements des tables de translation pour intercaler des insolations successives et ainsi remplir les zones non-insolées dues aux espaces interpixels du MSL (voir figures 34, 35). Enfin, nous avons remarqué que les niveaux de gris des MSL destinés à l'affichage visuel n'étaient pas suffisamment linéaires ou reproductibles pour contrôler individuellement le dosage spatial de l'insolation de chaque pixel et rendre possible l'écriture directe d'EOD à plusieurs niveaux de phase. Nous avons donc développé une technique de découpage des niveaux de gris en une succession d'images binaires et un contrôle du dosage d'insolation par temps de pose différents pour chaque image binaire sans déplacement des platines de translation. Ces techniques couplées avec une adaptation et une bonne maîtrise des conditions du développement de la photorésine nous ont permis de fabriquer des EOD multi-niveaux de phase très performants pour des applications très diverses dont nous donnons quelques exemples à la section 5.6 . Les détails de la mise au point de phototraceur DRAWMAP, de ces techniques de

phototraçage et des résultats obtenus sont décrits dans les thèses de Marwa El Bouz [116] puis de Melanie Kessels [117] et dans la référence [51] reproduite en annexe.

Comme expliqué à la section 4.4.3 nous avons suivi l'évolution des MSL pour améliorer les performances (vitesse, résolution ...) du phototraceur DRAWMAP à plusieurs reprises. Nous avons également adapté des techniques de correction de proximité (« proximity correction ») à notre phototraceur pour améliorer encore la résolution de tracé. Ces techniques, utilisées dans l'industrie micro-électronique quand la tache de photoinscription est plus grande que la grille d'adressage, précompense les données de tracé pour corriger en partie la convolution des structures désirées par la fonction d'appareil. La référence [118] explique comment nous avons adapté les techniques classiques aux particularités de notre phototraceur (matrice de pixels rectangulaires plutôt que le faisceau gaussien habituel) et également développé de nouvelles techniques en utilisant les possibilités de la technique de variation locale du dosage de l'exposition expliquée au dessus.

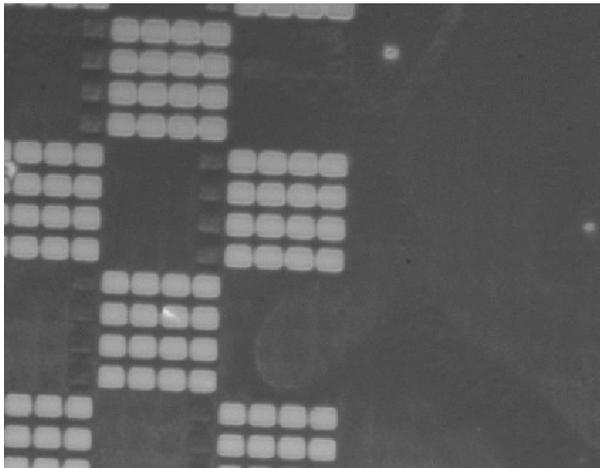


Figure 34: Structures obtenus en photorésine sans la technique de sur-résolution

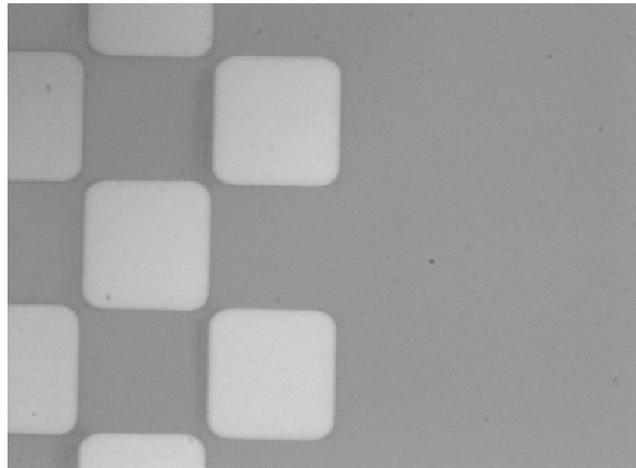


Figure 35: Structures obtenus en photorésine avec la technique de sur-résolution

Il faut noter ici que, bien sûr, nous n'étions pas les seuls à avoir vu les possibilités très intéressantes offertes par la photo-inscription massivement parallèle par MSL. Mivatec appliquait déjà la technique pour écrire des structures d'environ 100mm et en même temps et depuis, plusieurs autres équipes ont étudié des approches semblables [119], [120], [121] Le travail de collaboration entre une équipe du Fraunhofer Institut [39] et le fabricant d'équipement photolithographique Micronics [122] est particulièrement remarquable [123] car il a conduit au développement des machines de photolithographie parmi les plus performantes du monde. Il existe également une variante importante [124], que nous avons étudiée indépendamment dans le projet DRAWMAP, qui combine l'utilisation de MSL et de tableaux de microlentilles (technique souvent connue sous le nom de ZPLA - "Zone-plate-array Lithography"). Cependant, ces travaux visent l'industrie de la micro-électronique et donc des performances (structures de ~100nm, substrats 150mm, MSL à MEMS sur-mesure fonctionnant à une longueur d'onde de 248nm ...) et des coûts (jusqu'à plusieurs dizaines de millions d'Euros pour un phototraceur Micronics) qui correspondent. De plus ces approches utilisent typiquement des facteurs de photo-réduction très grands (100:1) et donc des techniques spécifiques de phototraçage (sur-résolution, dosage d'exposition multi-niveaux ...) différentes des nôtres. On voit que ces phototraceurs et travaux ne sont pas adaptés à notre cible – le prototypage rapide et faible-coût de EOD performants. Pour cette application et pour des applications qui nécessitent de tailles de structures semblables (~1µm), notre phototraceur paraît particulièrement concurrentiel.

Enfin, nous soulignons un dernier avantage et spécificité important de ce phototraceur : sa grande versatilité. Nous avons conçu le module MSL comme un module amovible. Il est donc tout à fait possible d'utiliser le phototraceur pour fabriquer un masque de chrome et ensuite remplacer le

module MSL par ce masque de chrome et faire fonctionner le phototraceur comme photorépéteur classique pour la fabrication rapide de séries de EOD. C'est grâce à ce phototraceur qu'au département d'optique nous sommes aujourd'hui capable de fabriquer des EOD multi-niveaux de phase (en pratique phase continue due au lissage de l'optique de projection) avec des motifs de $\sim 1,5\mu\text{m}$, sur des surfaces de $15 \times 15 \text{cm}$ (en pratique l'EOD le plus grand fabriqué jusqu'à ici est de 70mm de diamètre) à des vitesses autour du $\text{cm}^2/\text{minute}$.

Ces performances très concurrentielles nous ont conduit à créer la société Holotetrix spécialisée dans la modélisation, l'étude et la commercialisation de EOD prototypes. Cependant, dans le but de pousser la technique de phototraçage parallèle encore plus loin, nous avons cherché à contourner la limitation principale du phototraceur DRAWMAP : l'utilisation des longueurs d'ondes visibles imposée par le MSL à CL. Pour atteindre des résolutions submicroniques et pour pouvoir utiliser une gamme de matériaux photosensibles plus large et plus intéressante il nous a paru important de suivre les évolutions de la technologie photolithographique vers les longueurs d'ondes plus courtes dans l'UV. Comme indiqué à la section 4.4.7 nous avons fait ceci dans le cadre du projet Région Bretagne PRINT et le projet Européen NEWTON (détails administratives dans l'annexe 3) en construisant un nouveau phototraceur basé sur les mêmes principes que le phototraceur DRAWMAP mais centré autour d'un MSL à micromiroirs (DMD). Pour ce nouveau phototraceur, puisque le DMD travaille en réflexion, nous avons du modifier tout le schéma optique (figures 36 et 37).

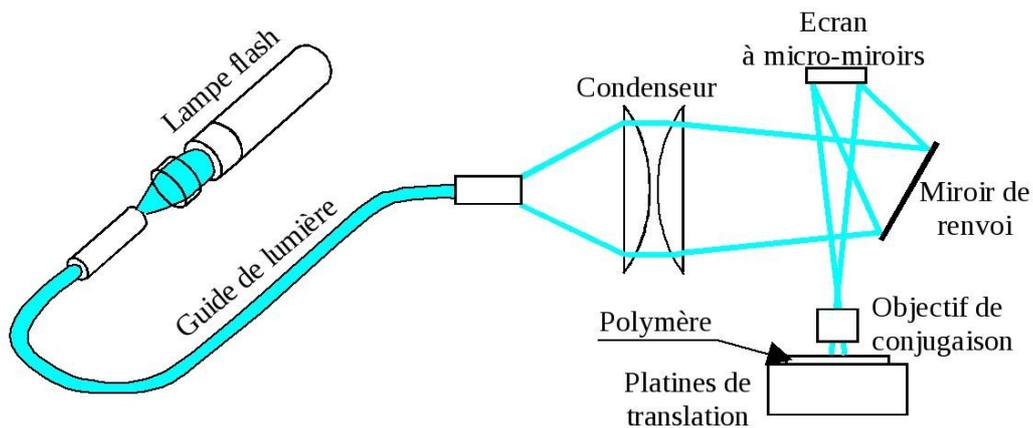


Figure 36: Schéma du phototraceur à DMD, "PRINT"



Figure 37: Photographie du phototraceur à DMD "PRINT"

Dans une première version (thèse de Mélanie Kessels), destinée à confirmer la faisabilité de l'approche, nous avons utilisé une lampe à vapeur de mercure comme source, filtrant soit la raie g (436nm) soit la ligne i (365nm). Ce prototype nous a permis d'écrire des structures avec des détails submicroniques et également dans des matériaux du type sol-gel « Ormocomp » [66] aux propriétés optiques très intéressantes à la fois pour les EOD et les circuits de guides optiques planaires. Ce travail est présenté en détail dans la référence [67], reproduite en annexe 6.

Ce premier prototype a permis de confirmer la faisabilité, mais des problèmes liés à l'uniformité d'illumination du DMD, à la faible performance des platines de translation XY et de l'objectif de microscope (surtout distorsion) de photoréduction nous ont empêché d'utiliser le prototype pour la fabrication de EOD commercialisables. Dans le cadre de la thèse de Charbel Nassour nous assemblons actuellement un deuxième prototype doté d'une source flash xénon, à spectre plus large (et donc utilisable avec une plus grande gamme de matériaux photosensibles) et plus facilement synchronisable avec le MSL et les tables de translation, d'un objectif de microscope UV corrigé en distorsion et de nouvelles platines de translation nettement plus performantes (répétabilité <100nm, course 100x100cm) [125].

A noter que cette expérience approfondie du phototraçage parallèle haute résolution est de plus en plus reconnue dans l'industrie et à l'internationale. En 2006 nous avons été contactés par notre partenaire de longue date Mivatec, qui nous a passé le contrat OPTILSYS (annexe 3) pour l'étude et prototypage du système d'illumination des modulateurs DMD utilisé dans leurs phototraceurs haut de gamme. En 2008 un autre entreprise internationale (nom protégé par une clause de confidentialité) nous a commandé une étude (NANO PLOT) autour d'une utilisation très spécifique d'un MSL en photo structuration. Enfin, tout récemment, une équipe de Karl Zeiss Jena travaillant également avec des DMD pour le phototraçage [120] nous a contacté au sujet de collaborations possibles dans ce domaine.

5.4.3 Copie d'EOD par nano-embossage

Nous avons indiqué à la section 5.4.2 que, bien que l'écriture directe soit moins adaptée à la production de masse que les techniques de masquage, la copie par nano-embossage (« nano-imprint ») permettait de contourner ces inconvénients. Cette technique (voir chapitre 6 de [69] pour son application aux EOD) part d'un prototype en photorésine sur substrat et en fait un moule, typiquement en nickel, par évaporation et puis croissance dans un bain d'électrolyse. Le moule sert ensuite pour fabriquer des copies par embossage dans des polymères optiques, réticulés thermiquement ou par UV. C'est la technique utilisée par exemple pour la fabrication de CD, DVD et d'hologrammes de sécurité (documents d'identité, cartes de crédit, billets de banque ...) qui est donc parfaitement maîtrisée et souvent encore moins cher que les techniques de masquage photolithographique – surtout pour des structures multi-niveaux. Son seul vrai inconvénient en production de masse est la transparence des éléments copiés, qui est plus faible et de spectre plus étroit que pour les éléments gravés dans des substrats comme le silice (particulièrement performante dans l'UV) obtenus après masquage.

Pour nos besoins de prototypage ou de fabrication de petites séries, l'intérêt de la copie est réduite cependant par le coût de la fabrication du moule nickel. C'est pour cette raison que nous avons cherché à simplifier la réalisation du moule à l'aide des nouveaux matériaux sol-gel de la famille Ormocer (Ormocomp, Ormostamp ...). Comme le montre la figure 38, dans le cadre de la thèse d'Aurélien Chan Yong nous avons récemment stabilisé un processus de copie d'EOD en photorésine directement en Ormocomp sans passer par l'étape du moule en nickel, donc beaucoup plus rapide et plus simple. Cette copie offre deux grands avantages. L'Ormocomp possède d'excellentes propriétés optiques (très transparent dans le visible et IR), thermiques (>220°C contre 120°C pour la photorésine) et chimiques (nettoyage à l'alcool ou acétone, la photorésine étant

soluble dans les deux). Il est aussi possible de faire rapidement plusieurs copies identiques d'un même original (nous obtenons des variations des efficacités de diffraction de moins de 1%) donc il convient parfaitement à la fabrication de petites séries. Ce processus de recopie sans moule nickel est en cours de publication [126] et de transfert vers Holotetrix. Nous cherchons maintenant à l'étendre à la fabrication et de copie de guides d'ondes pour circuits optiques intégrés.

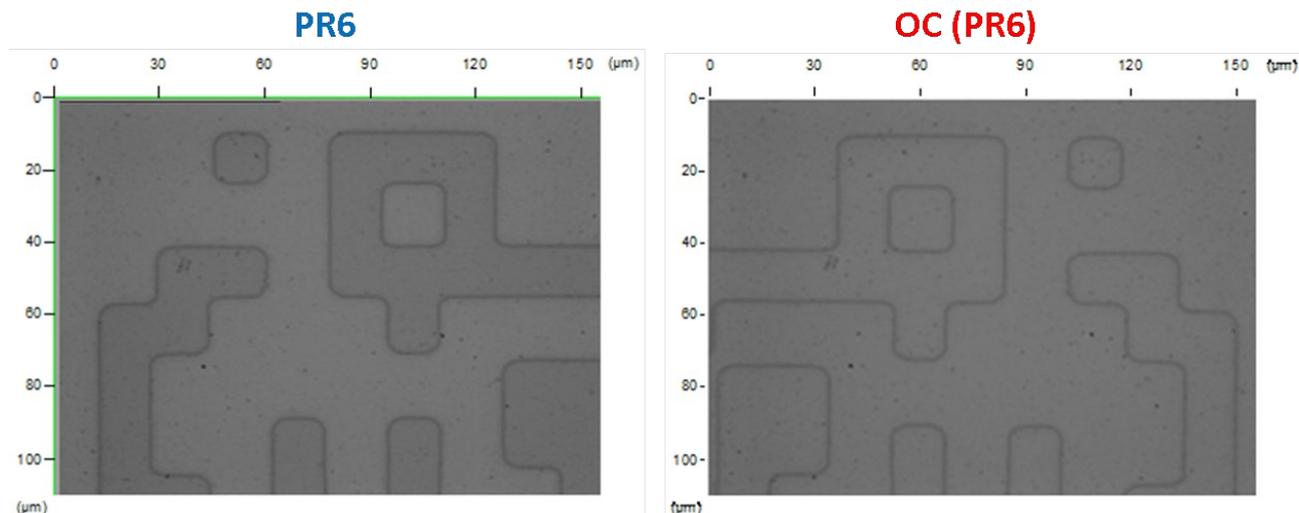


Figure 38: Vue au microscope de (gauche) un EOD original photorésine et (droit) une copie enOrmocomp.

5.5 Caractérisation

En parallèle à ces progrès dans les techniques de fabrication de EOD, il a bien sûr été tout aussi important d'avancer sur les techniques de caractérisation des éléments fabriqués afin de vérifier et d'optimiser la fabrication et calibrer les logiciels de modélisation et calcul de EOD. Cette caractérisation se fait à deux niveaux: structurel – est-ce que les structures diffractantes de l'EOD ont la forme et les dimensions désirées; et fonctionnel – est-ce que l'EOD diffracte la lumière avec l'efficacité et la fidélité (erreur) demandées ?

Puisque nous avons fait le choix de travailler avec des EOD dans le régime scalaire, donc avec des dimensions critiques de l'ordre du micron, la caractérisation structurelle peut se faire à l'aide de microscopes optiques (on évite ainsi la complexité et le coût des microscopes électroniques, le champ limité des microscopes à force atomique – et leurs analyses souvent destructives de l'échantillon). Un microscope classique de bonne qualité suffit pour caractériser les dimensions XY, cependant pour la mesure critique de la forme 3D des EOD un microscope interférométrique est nécessaire : une précision de quelques nm est requise sur la profondeur de gravure pour un bon contrôle de la phase d'un EOD. Depuis la mise en service de notre chaîne de fabrication nous avons travaillé en lien avec l'université de Besançon, spécialiste de la nanométrie, qui nous a fourni, au travers des améliorations successives, un microscope interférométrique spécifiquement adapté à la caractérisation structurelle de EOD. Quelques exemples des cartes 3D de nos EOD obtenus avec ce microscope se trouvent aux figures 39, 40, 41 et 46. Pour la caractérisation fonctionnelle, des bancs optiques avec photodétecteur, cameras CCD et IR, des sources laser aux longueurs d'ondes clés (633nm, 432nm, 1550nm) et un spectromètre permettent de mesurer les autres paramètres importants.

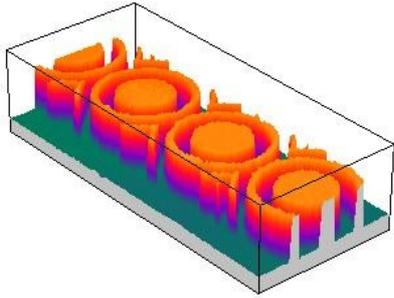


Figure 39: Barrette de micro-lentilles diffractives

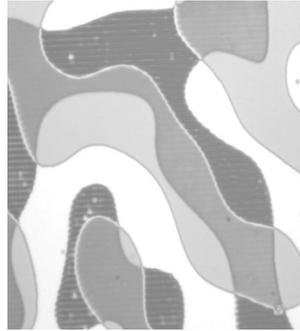


Figure 40: EOD à 4 niveau de phase (vue interférométrique)

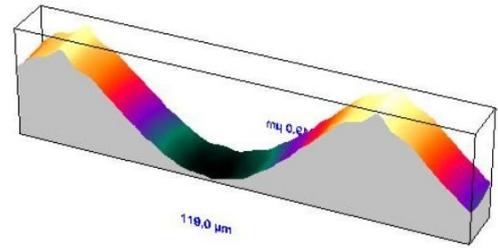


Figure 41: Vue 3D d'un réseau de phase à profil de phase continue réalisé par phototraçage parallèle

Grâce à cette expérience et aux moyens de caractérisation mis en place, nous avons pu participer à deux projets Européens. Dans le premier, LASSAR, notre rôle concernait le développement d'une nouvelle technique de caractérisation de fronts d'onde (et d'EOD) à partir de leurs figures de diffraction (l'approche à déjà été décrite à la section 4.4.4 donc nous ne rentrerons pas dans les détails ici). Le deuxième, NEWTON (détails à l'annexe 3 et [127]) s'intéressait à l'étude et la fabrication de structures à cristaux photoniques (CP) [128] à trois dimensions par auto-assemblage de micro-sphères suivi de photoinscription de guides optiques à l'intérieure des cristaux. Notre implication dans ce projet se retrouvait à deux niveaux. Nous avons apporté notre savoir faire en phototraçage parallèle pour augmenter la vitesse de photoinscription des guides (thèse de Mélanie Kessels) et nous étions responsables de la caractérisation des structures à cristaux photonique réalisés par les autres partenaires (thèse de Nolwenn Dissaux). Nous avons montré [129] comment un microscope interférométrique permet de caractériser simplement, rapidement (et surtout sans endommager l'échantillon) l'orientation des axes des cristaux. Même si la taille des microsphères est en dessous de la résolution d'un microscope optique, les interférences permettent de visualiser les couches des microsphères à la surface du cristal et déterminer l'orientation de axes (figure 42).

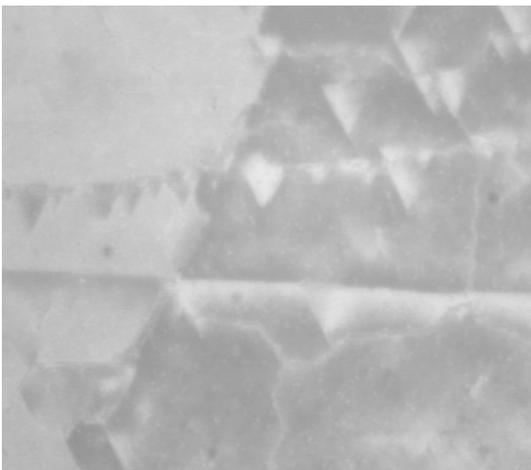


Figure 42: Vue au microscope interférométrique de la surface d'une structure à cristaux photoniques. L'orientation des triangles indique les axes du cristal.

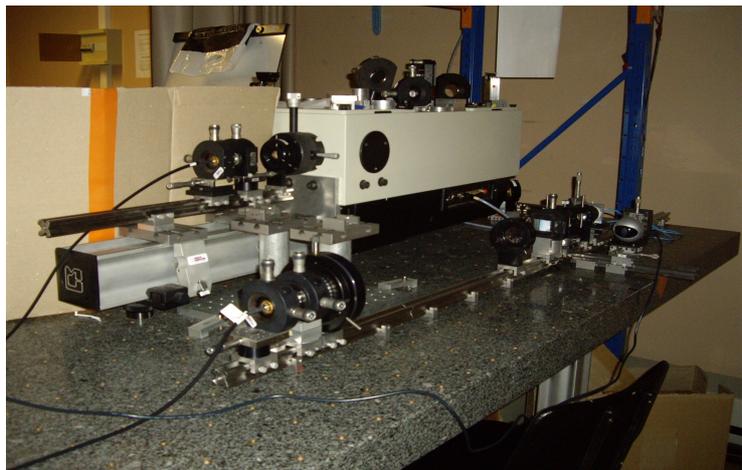


Figure 43: Photographie du banc de caractérisation de petits échantillons de cristaux photoniques dans le laboratoire de Telecom Bretagne

Nous avons aussi conçu et assemblé un banc (figure 43) pour analyser les spectres de transmission et de réflexion de petites zones choisies (quelques $100\mu\text{m}^2$) des échantillons de CP souvent très petits. Ces mesures ont contribué à la calibration [130] de la modélisation et la simulation numérique de ces structures encore incomplètement comprises et à la démonstration expérimentale de l'épaisseur de CP nécessaire pour assurer un bon guidage de la lumière dans un CP 3D (figure 44).

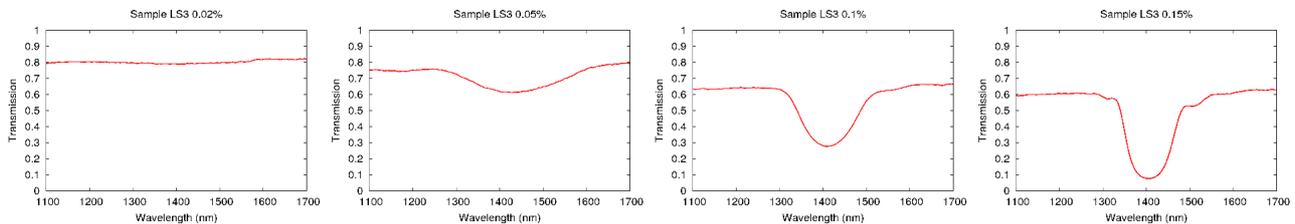


Figure 44: Spectres de transmission expérimentale pour des échantillons de structures type cristaux photoniques en fonction de l'épaisseur du cristal. De gauche à droite: le contraste de la bande interdite augmente avec l'épaisseur.

5.6 Applications

Dès que notre salle blanche et notre chaîne de fabrication de EOD sont devenues opérationnelles (environ 1997), en plus de fabriquer des EOD pour les besoins du département d'optique, nous avons cherché des applications en dehors de nos domaines de recherche propres par des collaborations avec des laboratoires partenaires et des contrats avec des clients industriels. Plus de 30 réalisations ont été livrées à plus de 20 partenaires en France, aux États-Unis, en Pologne, en Belgique et aussi plusieurs clients industriels comme Thalès, France Telecom, CEA et d'autres que nous ne pouvons pas nommer pour des raisons de confidentialité des études. Il serait trop long de rentrer dans les détails de toutes ces études, nous indiquons donc ici simplement quelques exemples représentatifs qui ont été publiés et dont on peut en conséquence parler librement.

5.6.1 Mesure front d'onde

Cette application venait de nos contacts avec Jérôme Primot de l'ONERA. L'idée du montage, schématisé à la figure 45 est qu'un front d'onde inconnu illumine un EOD qui en génère trois copies. Ces trois copies s'interfèrent entre elles et cette figure d'interférence est captée sur un caméra CCD. Un traitement numérique de la figure captée permet de remonter à la forme (amplitude et phase) du front d'onde inconnu. Nous avons participé à la conception du EOD (figure 46) à trois niveaux de phase et assuré la fabrication par deux étapes de masquage. Cette collaboration, qui s'est soldée par une publication commune [113] (reproduite en annexe 6) a porté beaucoup de fruits car elle a conduit à la commande de plusieurs éléments semblables par le CEA, de l'École Polytechnique et de l'Université de Michigan aux EU. Enfin, un système d'analyse de front d'onde basé sur ce principe est maintenant commercialisé par l'entreprise Phasics [131].

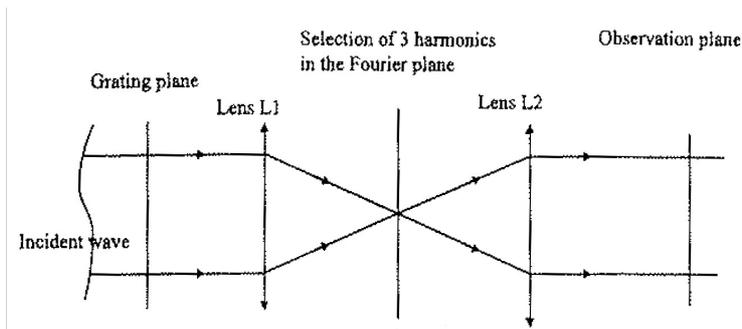


Figure 45: Schéma de l'analyseur de faisceau à base de EOD (« grating »).

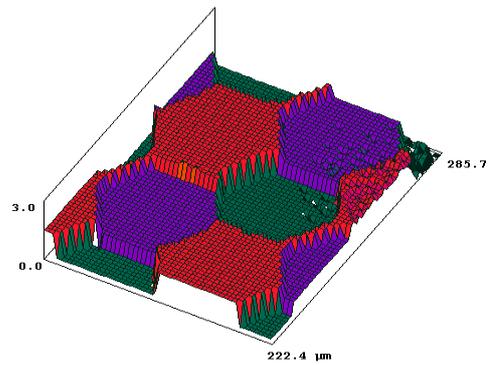


Figure 46: Vue 3D obtenue par microscope interférométrique du EOD 3 niveaux de phase utilisé dans le système d'analyse de faisceau

5.6.2 Interconnexion de fibres multi-cœurs

Pendant les années 1990, le centre de recherches de France Telecom à Lannion a mis au point un procédé de fabrication de fibres multi-cœurs, permettant de multiplier la capacité de transport de données d'un fibre sans changer ces dimensions extérieures. L'inconvénient majeur était la connectique difficile avec des fibres optiques standards. France Telecom a donc lancé des études pour simplifier la connexion des fibres multi-cœurs avec les composants standards. Nous avons été choisis pour étudier un connecteur à base de micro-optiques et d'EOD figure 47. J'ai contribué à cette étude, sujet de la thèse d'Eric Quertement [115] (encadré par Raymond Chevallier) au travers de la conception et la fabrication des EOD et en tant qu'inventeur au brevet déposé [132] pour protéger l'approche.

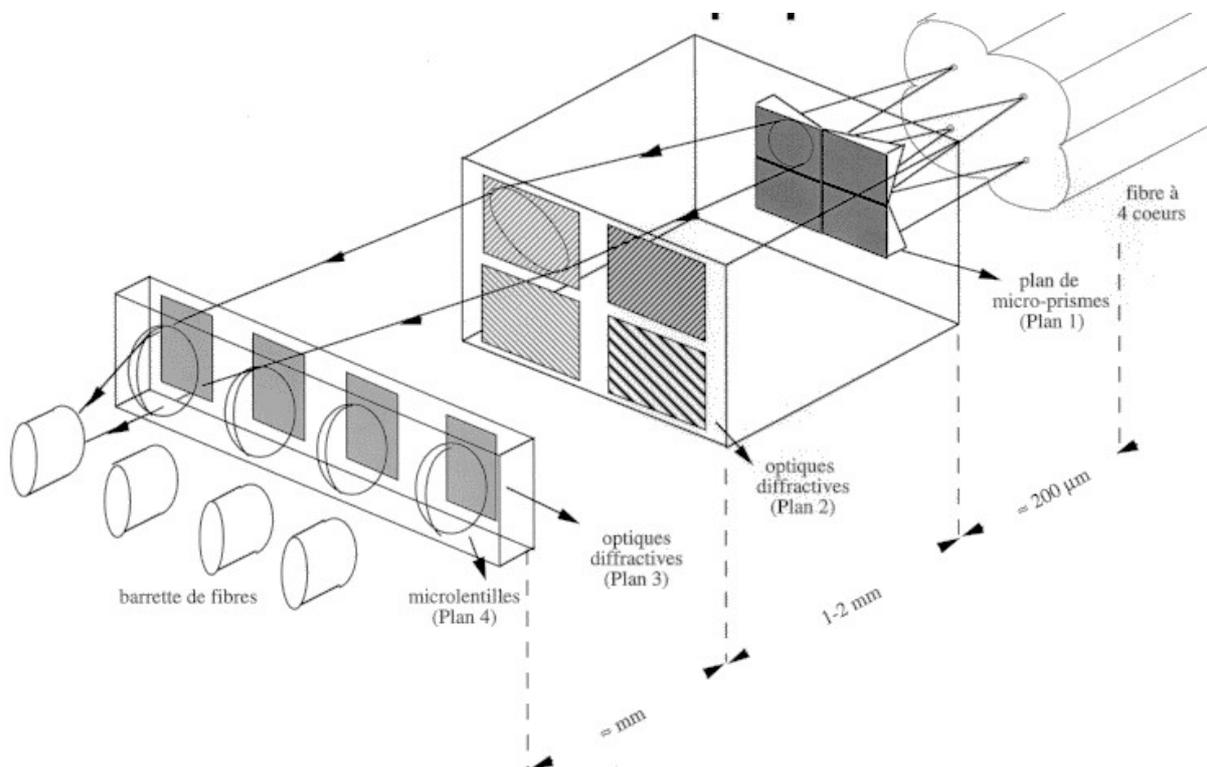


Figure 47: Schéma de système d'interconnexion d'une fibre multi-cœur avec une matrice de fibres optiques standards

5.6.3 Holotetrix

Devant la demande relativement importante d'études et de prototypages de EOD et le peu d'intérêt académique de beaucoup des demandes (ex. composants classiques, tels des tableaux de microlentilles diffractives ou réseau de Dammann mais avec des focales ou pour des longueurs d'ondes spécifiques), vers 2005 nous avons commencé à étudier les possibilités de création d'une entreprise « start-up » dans l'incubateur de Telecom Bretagne. Après une étude de marché encourageante et le prix GET (Groupe des Écoles de Télécommunication) et de la fondation Louis Leprince Ringuet 2006, en 2007, avec Jean-Louis de Bougrenet et Denis Battarel nous avons créé l'entreprise « start-up » Holotetrix. Cette entreprise, gérée par Denis Battarel, se spécialise dans l'étude, la conception et la fabrication de prototypes et de petites séries de EOD. Elle s'appuie, par un contrat d'essaimage et une licence d'exploitation sur l'expérience et les moyens de fabrication mis au point à Telecom Bretagne.

Les liens entre notre département et Holotetrix restent naturellement très étroites et bénéfiques pour les deux : le département reste proche des besoins industriels et l'entreprise au courant des derniers développements dans la modélisation et fabrication des EOD. Cette relation étroite nous a permis de participer ensemble à plusieurs projets et études (détails en annexe 3), en particulier une étude OSEO sur la copie par embossage d'EOD dans les matériaux sol-gel et actuellement, avec l'Université de Bretagne Sud, au projet Région Bretagne HOLONAS sur la conception et fabrication de EOD prototypes pour la mise en forme de faisceaux issus des barrettes laser utilisés par l'entreprise Lannionaise LASEO.

5.7 Conclusion et perspectives

De ce que nous avons vu dans ce chapitre des évolutions dans la modélisation, la fabrication et l'application des EOD et de notre expérience de maintenant plus de 20 ans dans le domaine, on peut tirer quelques conclusions générales qui peuvent servir de guides pour celui qui cherche un EOD pour une application particulière.

Concernant le calcul des EOD, la modélisation et calcul en régime scalaire de diffraction est maintenant bien maîtrisé avec plusieurs algorithmes performants. Cependant en pratique l'IFTA sera très souvent choisi plutôt que les autres car il offre le meilleur compromis performance/coût de calcul, est particulièrement adapté au calcul des EOD multi-niveaux de phase plus performants et enfin il permet le calcul de EOD finement échantillonnés (grand nombre de pixels) qui minimisent l'influence des erreurs de fabrication et donnent des EOD avec de bonnes performances pratiques et pas seulement théoriques.

Pour la fabrication, les deux grandes familles de techniques, masquage et écriture directe, continuent et continueront probablement de co-exister. Le masquage bénéficie de la grande maturité de l'industrie de fabrication de la micro-électronique, de ses progrès en résolution/précision (qui dépassent souvent les besoins d'un EOD) et surtout son faible coût de production en grande série. Pour ces raisons, la fabrication par masquage restera vraisemblablement une technique de fabrication concurrente de grandes séries de EOD et dans les applications à fort flux laser. Pour le prototypage cependant, l'écriture directe, plus rapide et moins chère, semble plus adaptée. Sa capacité à réaliser des EOD très performants à phase continue est un autre avantage important et la maturité de la technique de recopie permet une fabrication en masse souvent encore moins chère que le masquage – surtout pour des EOD multi-niveaux de phase. Il nous semble que cet avantage de coût fera de l'écriture directe/copie la technique de fabrication majoritaire dans l'avenir.

Les applications d'EOD sont déjà très variées et dans certaines applications (ex. têtes de lecture CD/DVD et lecteurs à codes barres) ces composants sont très répandues. La progression des

techniques et technologies photoniques, dans, par exemple, l'éclairage à LED ou les applications industrielles et médicales des lasers, laisse espérer que cette tendance s'accélérera dans les années à venir. Pour encourager ce mouvement il est important de pouvoir concevoir et réaliser des EOD prototypes rapidement et à prix raisonnable et ensuite passer à la production de séries faible coût. C'est précisément la visée de l'écriture directe massivement parallèle suivi de copie par embossage que nous avons mis au point au département d'optique et transféré à Holotetrix.

Pour les perspectives de recherche en fabrication nous prévoyons la poursuite des progrès vers des structures plus petites, des EOD plus grands et une fabrication plus rapide. Il y a donc encore besoin de continuer les développements de la technique de photo-inscription parallèle à base de MSL vers des MSL comportant plus de pixels plus petits et surtout vers des longueurs d'ondes d'inscription plus loins dans l'UV. Cependant, il est clair que la progression à l'UV plus profond (248nm, 193nm) posera de grands problèmes de coût des sources, des objectifs de projection et de disponibilité des MSL adaptés. C'est pour cela que nous regardons depuis quelque temps les possibilités de dépassement des limites de la photo-inscription classique (limite de diffraction des objectifs de projection) qu'offre la photo-polymérisation à deux photons (2PP pour « two photon polymerisation » [133] [134] [135]). Avec cette technique on focalise dans une petite tache (~micron) le faisceau d'un laser à impulsions très courtes (~femtoseconde), le fort confinement spatial de l'énergie lumineuse ainsi réalisé produit des effets non-linéaires d'absorption et polymérisation qui peuvent être très confinés dans le volume (en dessous de la limite de diffraction classique). Dans le cadre du projet NEWTON, nous avons travaillé avec le partenaire Laser Zentrum Hannover (LZH) spécialiste de la 2PP, pour combiner cette technique avec notre technique de phototraçage massivement parallèle et ainsi contourner son désavantage principale : la lenteur d'une écriture mono-faisceau, voxel par voxel (figure 48). Des premiers résultats (publication en cours) se trouvent à la figure 49. Ils indiquent que la photo-polymérisation 2PP parallèle à l'aide d'un MSL est possible (à notre connaissance c'est la première démonstration de ce type). Nous avons lancé des projets de collaboration afin de poursuivre ces recherches très prometteuses.

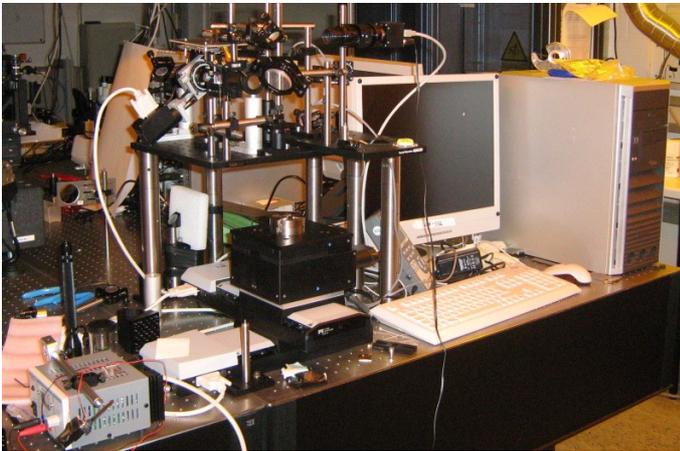


Figure 48: Photographie du montage expérimental de photoinscription parallèle 2PP au LZH comportant un MSL de Telecom Bretagne



Figure 49: Structure obtenue par 2PP quand un réseau binaire vertical était affiché sur le MSL

Les perspectives dans la modélisation/calcul de EOD vont naturellement de paire avec les progrès dans la fabrication. Il est maintenant possible de fabriquer les EOD de grande taille finement échantillonnés; nous regardons donc la parallélisation ([136], [137], [138] du calcul des EOD en régime scalaire et la précompensation [118] des limitations de la technique de fabrication dans les algorithmes de calcul des EOD [104]. Il est clair également qu'avec la résolution qu'offrent nos phototraceurs parallèles en développement, la restriction au régime scalaire de diffraction approche ses limites. Sans forcément rentrer dans le domaine complexe des régimes vectoriels et des

structures plus petites que la longueur d'onde sur lequel beaucoup d'équipes travaillent déjà, nous comptons étudier les extensions du régime scalaire (voir chapitre 2 du [69] et [139] [140] [141] [142] par exemple) et leur application aux EOD comportant des structures dont les dimensions critiques sont de quelques multiples (2λ , 3λ) de la longueur d'onde.

6 Conclusion et perspectives

J'espère, dans les trois chapitres techniques que nous venons de voir, avoir démontré des connaissances et compétences scientifiques et techniques approfondies dans les thèmes de recherche choisis. J'espère aussi avoir rendu clair mon attachement à traiter tous les aspects de la recherche : la théorie et la modélisation (calcul de EOD), la caractérisation (des EOD et cristaux photoniques), la conception, le montage et la mise aux point de systèmes expérimentaux innovants et l'application industrielle des connaissances et techniques développées. J'ai également essayé de souligner le fait que ces travaux se sont fait dans le cadre de nombreux contrats et projets de recherche (Européens, Nationaux Régionaux, Industriels) que j'ai entièrement ou partiellement dirigés et de thèses de doctorat que j'ai encadrées.

En plus des thèmes techniques, il y a sous-jacent dans ma présentation d'autres aspects de mon approche de la recherche scientifique qui me sont importants. Je ne les ai pas abordés directement dans le corps du manuscrit mais j'espère que leur importance est apparue naturellement.

Le premier concerne la maîtrise de l'outil informatique, parfois jusqu'à dans ses détails techniques comme le calcul parallèle ou programmation de carte graphiques. De part de ma formation, cela correspond à mon expérience et à un goût personnel mais pour correctement mener des recherches sur les EOD et pour tirer pleinement profit des MSL cette maîtrise me semble maintenant indispensable.

Le deuxième point concerne l'importance des collaborations industrielles et les fins industrielles de mes recherche. Bien que ma formation de base soit en physique il me semble essentiel, travaillant dans une école d'ingénieur, de viser l'application industrielle et commerciale des recherches. Pour moi, ceci est même au cœur de la définition de ce qu'est la recherche en ingénierie (« engineering »). C'est en ce sens que parmi tous les résultats de mes recherches, c'est la création et les perspectives de croissance de l'entreprise Holotetrix qui me donnent le plus de satisfaction.

Le dernier point concerne les collaborations et projets internationaux. A cause de mon parcours personnel particulier j'ai toujours été attiré par des collaborations internationales et les projets européens sont devenus un peu ma spécialité. Je considère que l'ouverture qu'apportent ces collaborations aux autres façons de penser, d'aborder et de pratiquer la recherche à toujours été bénéfique et a augmenté la créativité et la diversité de mes activités de recherche. J'espère vivement pouvoir continuer à travailler sur des projets internationaux à l'avenir.

J'ai déjà abordé les perspectives de recherche dans les conclusions des chapitres techniques mais il peut être utile de faire une synthèse ici. Le traitement optique de l'information continue à m'intéresser et j'étudierai de près des opportunités qui se présentent d'appliquer mes connaissances et mon expérience dans ce domaine. Cependant, les progrès des traitements électroniques ont réduit l'intérêt de l'optique dans ce domaine, c'est pourquoi après la soutenance de la thèse de Jérôme Ninot sur la reconnaissance de la signalisation routière, je ne compte pas poursuivre ce thème activement.

Sur le thème des MSL, grâce aux liens étroits que développe notre département avec Texas Instruments dans l'affichage 3D, nous comptons approfondir nos connaissances des DMD que nous maîtrisons moins bien que les MSL à CL. Ceci nous permettra de finaliser notre phototraceur à DMD et ouvrira la voie à la fabrication d'EOD et d'autres structures haute résolution et surtout la photoinscription dans de nouveaux matériaux. En même temps, nous suivrons de près les évolutions des MSL à CL pour rester à la pointe des progrès dans ce domaine et pour améliorer encore la

rapidité et la résolution de notre phototraceur à MSL à CL. Enfin, j'ai confiance que notre maîtrise démontrée de la technologie des MSL nous ouvrira, probablement via des collaborations, que j'espère internationales, d'autres applications – nous sommes déjà en contact par exemple avec un groupe cherchant à collaborer sur les MSL pour les applications biologiques.

Pour les EOD, il est maintenant clair que les progrès de nos moyens de fabrication nous ont amené aux limites de la théorie scalaire de la diffraction et que nous devons étudier les extensions de ce régime et probablement des modélisations plus complexes. Ces modélisations devront également tenir compte des contraintes et limites des techniques de fabrication, de préférence à l'intérieur même des algorithmes de calcul des EOD. Sur la fabrication, nous avons déjà montré la faisabilité de l'écriture directe de moules d'embossage d'EOD dans les sol-gels, sans passage par un original en photorésine. Dans le cadre des thèses de Charbel Nassour et d'Aurélié Yong nous espérons améliorer et stabiliser cette technique et l'appliquer à la fabrication de circuits intégrés optiques comportant des structures diffractantes. La copie par embossage de ces circuits offre de grandes opportunités de fabrication de circuits optiques à faible coût pour le marché potentiellement énorme qui se dessine dans le déploiement des fibres optiques jusqu'à l'abonné.

Enfin, nous venons de lancer un projet qui vise à poursuivre nos expérimentations sur la combinaison des techniques de phototraçage parallèle à MSL et de photo-polymérisation à deux photons. Ceci nous semble être un sujet de recherche très porteur qui permettra potentiellement de dépasser les limites des techniques de phototraçage classiques et qui ouvrira une palette d'applications très vaste dépassant largement les EOD. Avec l'aide complémentaire d'un bon partenaire expert dans la 2PP, grâce à notre expérience du phototraçage parallèle, je pense que nous sommes dans une position particulièrement favorable pour nous placer à la pointe des recherches dans cette direction.

7 Bibliographie

- [1] F. T. S. Yu and S. Jutamulia, *Optical Signal Processing, Computing, and Neural Networks*. Wiley-Interscience, 1992.
- [2] P. Ambs, "Optical Computing: A 60-Year Adventure," *Advances in Optical Technologies*, vol. 2010, 2010.
- [3] W. McCulloch and W. Pitts, "A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity.," *Bulletin of Mathematical Biophysics*, vol. 5, pp. 115-133, 1943.
- [4] J. J. Hopfield, "Neural networks and physical systems with emergent collective computational abilities," *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 79, no. 8, pp. 2554-2558, Apr. 1982.
- [5] T. Kohonen, *Self-Organization and Associative Memory*, 2nd ed. Springer, 1988.
- [6] Y. Idan, R. C. Chevallier, K. J. Heggarty, and G. Y. Sirat, "Invariance in an optoelectronic implementation of neural networks," in *Optical Interconnections and Networks*, vol. 1281, pp. 145-150, 1990.
- [7] K. Heggarty and R. Chevallier, "Optical implementation of an improved Hopfield-like retrieval algorithm," *Optics Communications*, vol. 88, no. 2, pp. 91-95, Mar. 1992.
- [8] M. Barge, K. Heggarty, Y. Idan, and R. Chevallier, "64-channel correlator implementing a Kohonen-like neural network for handwritten-digit recognition," *Applied Optics*, vol. 35, no. 23, pp. 4655-4665, 1996.
- [9] M. Barge, K. Heggarty, and R. Chevallier, "Two methods of reducing the dynamic range of a holographic filter," *Applied Optics*, vol. 35, no. 20, pp. 3880-3886, Jul. 1996.
- [10] Jérôme Duvillier, "Conception et réalisation d'une Carte auto-organisée optique, lien entre réseau de neurones formels et mémoire associative," Strasbourg, 1996.
- [11] J. Duvillier, M. Killinger, K. Heggarty, K. Yao, and J. L. de Bougrenet de la Tocnaye, "All-optical implementation of a self-organizing map: a preliminary approach," *Applied Optics*, vol. 33, no. 2, pp. 258-266, Jan. 1994.
- [12] Heggarty, Duvillier, Carpio-Perez, and De Bougrenet de la Tocnaye, "All-optical self-organising map applied to character recognition," *Conference series - Institute of physics*, vol. 139, p. 411, 1994.
- [13] K. Heggarty, J. Duvillier, E. Carpio Pérez, and J. L. de Bougrenet de La Tocnaye, "All-optical implementation of a self-organizing map: Learning and taxonomy capability assessment," Dec-1995. [Online]. Available: <http://adsabs.harvard.edu/abs/1995ApOpt..34.8167H>. [Accessed: 27-Apr-2010].
- [14] Laurent Guibert, "Etude et réalisation d'un corrélateur à cristaux liquides ferroélectriques ? Application à la détection automatique de panneaux routiers," Institut Télécom-Télécom Bretagne, 1995.
- [15] Yvon Petillot, "Vers une implantation de corrélateurs optiques temps réel : application à divers problèmes de reconnaissance des formes," Institut Télécom-Télécom Bretagne, 1996.
- [16] L. Guibert et al., "On-board optical joint transform correlator for real-time road sign recognition," *Optical Engineering*, vol. 34, no. 1, p. 135, 1995.
- [17] T. D. Wilkinson, Y. Petillot, R. J. Mears, and J. L. de Bougrenet de la Tocnaye, "Scale-invariant optical correlators using ferroelectric liquid-crystal spatial light modulators," *Applied Optics*, vol. 34, no. 11, pp. 1885-1890, Apr. 1995.
- [18] L. Smadja, J. Ninot, and T. Gavrilovic, "Global Environment Interpretation from a New Mobile Mapping System," presented at the 2010 IEEE Intelligent Vehicles Symposium, San Diego, USA., 2010.
- [19] J. Ninot and K. Heggarty, "Road Sign Recognition Using A Hybrid Evolutionary Algorithm And Primitives Fusion," presented at the Photogrammetry Computer Vision and Image Analysis 2010, Paris, 2010.
- [20] J. L. de Bougrenet de la Tocnaye and L. Dupont, "Complex amplitude modulation by use of

- liquid-crystal spatial light modulators,” *Applied Optics*, vol. 36, no. 8, pp. 1730-1741, Mar. 1997.
- [21] J. Oton, P. Ambs, M. S. Millan, and E. Perez-Cabre, “Multipoint phase calibration for improved compensation of inherent wavefront distortion in parallel aligned liquid crystal on silicon displays,” *Applied Optics*, vol. 46, no. 23, pp. 5667-5679, 2007.
- [22] “DLP® Discovery™ 4100 Overview - DMD, 51.2 Gigabits per second - TI.com.” [Online]. Available: <http://focus.ti.com/dlpdmd/docs/dlpdiscovery.tsp?sectionId=60&tabId=2238>. [Accessed: 02-Jun-2010].
- [23] “HOLOEYE Photonics AG & HOLOEYE Corporation - Spatial Light Modulators : www.holoeye.com.” [Online]. Available: <http://www.holoeye.com/>. [Accessed: 14-Jun-2010].
- [24] “BBS - bild- und lightsysteme : www.bbs-bildsysteme.com.” [Online]. Available: <http://www.bbs-bildsysteme.com/index.htm>. [Accessed: 14-Jun-2010].
- [25] “ViALUX Messtechnik + Bildverarbeitung GmbH : www.vialux.de.” [Online]. Available: http://www.vialux.de/HTML/en_index.htm. [Accessed: 14-Jun-2010].
- [26] U. Efron, *Spatial light modulator technology: materials, devices, and applications*. CRC Press, 1994.
- [27] “Micron - Displaytech FLCOS Microdisplay Technology. <http://www.displaytech.com/>.” [Online]. Available: <http://www.displaytech.com/>. [Accessed: 07-Jun-2010].
- [28] “Forth Dimension Displays. <http://www.forthdd.com/>.” [Online]. Available: <http://www.forthdd.com/>. [Accessed: 07-Jun-2010].
- [29] “Boulder Nonlinear Systems - Technology in a New Light.” [Online]. Available: <http://www.bnonlinear.com/>. [Accessed: 15-Sep-2010].
- [30] S. E. Lyshevski, *MEMS and NEMS: systems, devices, and structures*. CRC Press, 2002.
- [31] Collectif, *Microsystèmes opto-électromécaniques: MOEMS*. Hermès Science Publications, 2003.
- [32] T. W. Yeow, K. L. Law, and A. Goldenberg, “MEMS optical switches,” *IEEE Communications magazine*, vol. 39, no. 11, pp. 158–163, 2001.
- [33] D. M. Bloom, D. B. Corbin, W. C. Banyai, and B. P. Straker, “Flat diffraction grating light valve,” U.S. Patent PCT/US1996/008804Nov-1998.
- [34] D. T. Amm and R. W. Corrigan, “Optical performance of the grating light valve technology,” *Photonics West-Electronic Imaging, Sunnyvale, CA*, pp. 1–8, 1999.
- [35] “Silicon Light Machines : www.siliconlight.com.” [Online]. Available: <http://www.siliconlight.com/htmlpgs/homeset/homeframeset.html>. [Accessed: 08-Jun-2010].
- [36] “Deformable Mirrors : www.bostonmicromachines.com.” [Online]. Available: <http://www.bostonmicromachines.com/deformable-mirrors.htm>. [Accessed: 15-Jun-2010].
- [37] F. Roddier, *Adaptive optics in astronomy*. Cambridge University Press, 1999.
- [38] “Fraunhofer IPMS : www.ipms.fraunhofer.de.” [Online]. Available: <http://www.ipms.fraunhofer.de/en/>. [Accessed: 08-Jun-2010].
- [39] Seltmann, Doleschal, and Gehner, “New system for fast submicron optical direct writing,” *Microelectronic Engineering*, vol. 30, pp. 123-127, Sep. 1995.
- [40] W. Ross, D. Psaltis, and R. Anderson, “Two-dimensional magneto-optic spatial light modulator for signal processing,” *Optical Engineering*, vol. 22, pp. 485-490, 1983.
- [41] U. Arad, E. Redmard, M. Shamay, A. Averboukh, S. Levit, and U. Efron, “Development of a large high-performance 2-d array of GaAs-AlGaAs multiple quantum-well modulators,” *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 15, no. 11, pp. 1531-1533, 2003.
- [42] S. Junique et al., “GaAs-based multiple-quantum-well spatial light modulators fabricated by a wafer-scale process,” *Applied optics*, vol. 44, no. 9, pp. 1635–1641, 2005.
- [43] K. Sayyah, M. S. Welkowsky, P. G. Reif, and N. W. Goodwin, “High performance single crystal silicon liquid crystal light valve with good image uniformity,” *Applied Optics*, vol. 28, no. 22, pp. 4748-4756, Nov. 1989.
- [44] 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: applications to neurocomputing," *Applied Optics*, vol. 31, no. 20, pp. 3930-3936, Jul. 1992.
- [45] 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 modulators," *Optics Letters*, vol. 15, no. 24, pp. 1473-1475, Dec. 1990.
- [46] S. Mias, I. G. Manolis, N. Collings, T. D. Wilkinson, and W. A. Crossland, "Phase-modulating bistable optically addressed spatial light modulators using wide-switching-angle ferroelectric liquid crystal layer," *Optical Engineering*, vol. 44, no. 1, pp. 014003-7, Jan. 2005.
- [47] Kevin Heggarty, "Une implantation opto-electronique d'un réseaux de neurones formels," Telecom Paris, 1991.
- [48] K. J. Heggarty, R. C. Chevallier, Y. Idan, and G. Y. Sirat, "Optoelectronic implementation of a neural network," in *Optical Interconnections and Networks*, vol. 1281, pp. 136-144, 1990.
- [49] F. Pérennés and Z. Y. Wu, "Resolution and response-time dependence of ferroelectric liquid-crystal optically addressed spatial light modulators on grating profiles," *Applied Optics*, vol. 36, no. 17, pp. 3825-3834, Jun. 1997.
- [50] "MIVA Technologies GmbH : www.mivatec.com." [Online]. Available: <http://www.mivatec.com/>. [Accessed: 09-Jun-2010].
- [51] M. V. Kessels, M. El Bouz, R. Pagan, and K. Heggarty, "Versatile stepper based maskless microlithography using a liquid crystal display for direct write of binary and multilevel microstructures," *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS and MOEMS*, vol. 6, no. 3, pp. 033002-12, Jul. 2007.
- [52] R. Gerchberg and W. Saxton, "A practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction plane pictures," *Optik*, vol. 35, pp. 227-246, 1972.
- [53] J. R. Fienup, "Phase retrieval algorithms: a comparison," *Applied Optics*, vol. 21, no. 15, pp. 2758-2769, 1982.
- [54] K. Creath, *Phase-measurement interferometry techniques in Progress in Optics XXVI.*, vol. 26. North Holland, 1998.
- [55] A. Ashkin, J. M. Dziedzic, J. E. Bjorkholm, and S. Chu, "Observation of a single-beam gradient force optical trap for dielectric particles," *Optics Letters*, vol. 11, no. 5, pp. 288-290, May. 1986.
- [56] D. G. Grier, "A revolution in optical manipulation," *Nat Photon*, vol. 424, no. 6950, pp. 810-816, 2003.
- [57] "Collaborative Optical Spectroscopy, Micromanipulation and Imaging Centre (COSMIC) | School of Physics and Astronomy, www.ph.ed.ac.uk/research/cosmic." [Online]. Available: <http://www.ph.ed.ac.uk/research/cosmic>. [Accessed: 10-Jun-2010].
- [58] E. Dufresne and D. Grier, "Optical tweezer arrays and optical substrates created with diffractive optics, ?? Rev. Sci. Inst. 69, 1974,," *Rev. Sci. Inst.*, vol. 69, p. 1974, 1998.
- [59] E. R. Dufresne, G. C. Spalding, M. T. Dearing, S. A. Sheets, and D. G. Grier, "Computer-generated holographic optical tweezer arrays," *Review of Scientific Instruments*, vol. 72, no. 3, p. 1810, 2001.
- [60] W. Hossack, E. Theofanidou, J. Crain, K. Heggarty, and M. Birch, "High-speed holographic optical tweezers using a ferroelectric liquid crystal microdisplay," *Optics Express*, vol. 11, no. 17, pp. 2053-2059, 2003.
- [61] T. S. El-Bawab, *Optical Switching*, 1st ed. Springer, 2006.
- [62] P. Berthelé, B. Fracasso, and J. 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, no. 23, pp. 5461-5468, 1998.
- [63] P. Berthelé, E. Gros, B. Fracasso, and J. D. B. de la Tocnaye, "Efficient beam steering in the 1.55 micron window using large-tilt FLC - one-dimensional array," *Ferroelectrics*, vol. 214, no. 1, p. 117, 1998.

- [64] K. Heggarty, B. Fracasso, C. Letort, J. L. D. B. de la Tocnaye, M. Birch, and D. Krüerke, "Silicon Backplane Ferroelectric Liquid Crystal Spatial Light Modulator for Uses Within an Optical Telecommunications Environment," *Ferroelectrics*, vol. 312, no. 1, p. 39, 2004.
- [65] C. Letort, "Modélisation et évaluation de fonctions de routage tridimensionnel de canaux optiques au sein des réseaux WDM.," Institut Télécom - Télécom Bretagne, 2004.
- [66] "Micro resist technology GmbH www.microresist.de." [Online]. Available: <http://www.microresist.de/>. [Accessed: 14-Jun-2010].
- [67] M. Kessels, C. Nassour, P. Grosso, and K. Heggarty, "Direct write of optical diffractive elements and planar waveguides with a digital micromirror device based UV photoplotter," *Optics Communications*, vol. 283, no. 15, pp. 3089-3094, Aug. 2010.
- [68] "Light Peak Technology : techresearch.intel.com/articles/None/1813.htm. visité le 14/06/2010." [Online]. Available: <http://techresearch.intel.com/articles/None/1813.htm>. [Accessed: 14-Jun-2010].
- [69] H. P. Herzig, *Micro-Optics: Elements, Systems And Applications*, 1st ed. CRC Press, 1997.
- [70] S. Sinzinger, J. Jahns, and J. Jahns, *Microoptics*. Wiley-VCH, 2003.
- [71] D. C. O'Shea, *Diffractive optics: design, fabrication, and test*. SPIE Press, 2004.
- [72] M. Born, E. Wolf, and A. B. Bhatia, *Principles of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light*. CUP Archive, 2000.
- [73] D. Maystre, "Rigorous vector theories of diffraction gratings," in *Progress in Optics, XXI*, vol. 21, Elsevier Science.
- [74] J. Turunen, M. Kuittinen, and F. Wyrowski, "Diffractive optics: Electromagnetic approach," in *Progress in Optics, XL*, vol. 40, Elsevier, 2000, pp. 343-388.
- [75] J. W. Goodman, *Introduction to Fourier optics*. Roberts and Company Publishers, 2005.
- [76] J. W. Cooley and J. W. Tukey, "An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series, Math," *Mathematics of Computation*, vol. 19, pp. 297-301, 1965.
- [77] P. Pellat-Finet, *Optique de Fourier: Théorie métaxiale et fractionnaire*. Springer, 2009.
- [78] Bryngdahl and Wyrowski, "Digital Holography - Computer-generated holograms.," in *Progress in Optics XXVIII*, vol. 28, Elsevier Science, 1990, pp. 3-86.
- [79] M. A. Seldowitz, J. P. Allebach, and D. W. Sweeney, "Synthesis of digital holograms by direct binary search," *Applied Optics*, vol. 26, no. 14, pp. 2788-2798, Jul. 1987.
- [80] B. K. Jennison, J. P. Allebach, and D. W. Sweeney, "Efficient design of direct-binary-search computer-generated holograms," *Journal of the Optical Society of America A*, vol. 8, no. 4, pp. 652-660, Apr. 1991.
- [81] V. Boutenko and R. Chevallier, "Second order direct binary search algorithm for the synthesis of computer-generated holograms," *Optics Communications*, vol. 125, no. 1, pp. 43-47, Apr. 1996.
- [82] A. G. Kirk and T. J. Hall, "Design of Binary Computer Generated Holograms by Simulated Annealing -- Observation of Metastable States," *Journal of Modern Optics*, vol. 39, no. 12, p. 2531, 1992.
- [83] R. Hauck and O. Bryngdahl, "Computer-generated holograms with pulse-density modulation," *Journal of the Optical Society of America A*, vol. 1, no. 1, pp. 5-10, Jan. 1984.
- [84] S. Weissbach, F. Wyrowski, and O. Bryngdahl, "Quantization noise in pulse density modulated holograms," *Optics Communications*, vol. 67, no. 3, pp. 167-171, Jul. 1988.
- [85] R. Eschbach, "Comparison of error diffusion methods for computer-generated holograms," *Applied Optics*, vol. 30, no. 26, pp. 3702-3710, 1991.
- [86] E. Barnard, "Optimal error diffusion for computer-generated holograms," *Journal of the Optical Society of America A*, vol. 5, no. 11, pp. 1803-1817, Nov. 1988.
- [87] S. Weissbach and F. Wyrowski, "Error diffusion procedure: theory and applications in optical signal processing," *Applied Optics*, vol. 31, no. 14, pp. 2518-2534, May. 1992.
- [88] A. Kirk, K. Powell, and T. Hall, "A generalisation of the error diffusion method for binary computer generated hologram design," *Optics Communications*, vol. 92, no. 1, pp. 12-18, Aug. 1992.

- [89] F. Fetthauer, S. Weissbach, and O. Bryngdahl, "Equivalence of error diffusion and minimal average error algorithms," *Optics Communications*, vol. 113, no. 4, pp. 365-370, Jan. 1995.
- [90] K. Heggarty and R. Chevallier, "Signal window minimum average error algorithm for computer-generated holograms," *Journal of the Optical Society of America A*, vol. 15, no. 3, pp. 625-635, Mar. 1998.
- [91] M. El Bouz and K. Heggarty, "Signal window minimum average error algorithm for multi-phase level computer-generated holograms," *Optics Communications*, vol. 180, no. 1, pp. 21-28, Jun. 2000.
- [92] P. Hirsch, J. Jordan, and L. Lesem, "METHOD OF MAKING AN OBJECT DEPENDENT DIFFUSER - Patent 3619022," U.S. Patent 05/07294809-Dec-1971.
- [93] N. C. Gallagher and B. Liu, "Method for Computing Kinoforms that Reduces Image Reconstruction Error," *Applied Optics*, vol. 12, no. 10, pp. 2328-2335, Oct. 1973.
- [94] J. R. Fienup, "Iterative method applied to image reconstruction and to computer-generated holograms," *Opt. Eng.*, vol. 19, no. 3, pp. 291-305, 1980.
- [95] F. Wyrowski, "Iterative quantization of digital amplitude holograms," *Applied Optics*, vol. 28, no. 18, pp. 3864-3870, 1989.
- [96] D. Snyers and Y. Pétilot, "Image processing optimization by genetic algorithm with a new coding scheme," *Pattern Recognition Letters*, vol. 16, no. 8, pp. 843-848, Aug. 1995.
- [97] N. Yoshikawa, M. Itoh, and T. Yatagai, "Use of generic algorithm for computer-generated holograms," in *International Conference on Applications of Optical Holography*, vol. 2577, pp. 150-157, 1995.
- [98] D. Just and D. Ling, "Neural networks for binarizing computer-generated holograms," *Optics Communications*, vol. 81, no. 1, pp. 1-5, Feb. 1991.
- [99] C. Han, Y. Ishii, and K. Murata, "Reshaping collimated laser beams with Gaussian profile to uniform profiles," *Applied Optics*, vol. 22, no. 22, pp. 3644-3647, Nov. 1983.
- [100] T. Dresel, M. Beyerlein, and J. Schwider, "Design and fabrication of computer-generated beam-shaping holograms," *Applied Optics*, vol. 35, no. 23, pp. 4615-4621, 1996.
- [101] F. M. Dickey and S. C. Holswade, *Laser Beam Shaping: Theory and Techniques*, 1st ed. CRC Press, 2000.
- [102] H. Dammann and K. Görtler, "High-efficiency in-line multiple imaging by means of multiple phase holograms," *Optics Communications*, vol. 3, no. 5, pp. 312-315, Jul. 1971.
- [103] P. Ehbets, "Continuous-relief fan-out elements with optimized fabrication tolerances," *Optical Engineering*, vol. 34, no. 12, p. 3456, 1995.
- [104] J. Bengtsson, "Direct inclusion of the proximity effect in the calculation of kinoforms," *Applied Optics*, vol. 33, no. 22, pp. 4993-4996, 1994.
- [105] H. Schwarzer, S. Teiwes, and F. Wyrowski, "Non-pixelated design of computer-generated diffractive elements for increased diffraction efficiency,," presented at the EOS Diffractive Optics '07, Savonlinna, Finland, pp. 164-165, 1997.
- [106] H. Aagedal, F. Wyrowski, and M. Schmid, "Conséquence of high resolution lithography for the design in the paraxial domain," presented at the EOS Diffractive Optics '07, Savonlinna, Finland, pp. 166-167, 1997.
- [107] L. Legeard, P. Réfrégier, and P. Ambs, "Multicriteria optimality for iterative encoding of computer-generated holograms," *Applied Optics*, vol. 36, no. 29, pp. 7444-7449, Oct. 1997.
- [108] L. Bigué and P. Ambs, "Optimal Multicriteria Approach to the Iterative Fourier Transform Algorithm," *Applied Optics*, vol. 40, no. 32, pp. 5886-5893, Nov. 2001.
- [109] T. Peter, F. Wyrowski, and O. Bryngdahl, "Importance of Initial Distribution for Iterative Calculation of Quantized Diffractive Elements," *Journal of Modern Optics*, vol. 40, no. 4, p. 591, 1993.
- [110] O. Ripoll, V. Kettunen, and H. P. Herzig, "Review of iterative Fourier-transform algorithms for beam shaping applications," *Optical Engineering*, vol. 43, no. 11, pp. 2549-2556, Nov. 2004.
- [111] B. R. Brown and A. W. Lohmann, "Complex Spatial Filtering with Binary Masks," *Applied*

- Optics*, vol. 5, no. 6, pp. 967-969, Jun. 1966.
- [112] R. C. Chevallier, E. L. Falher, and K. J. Heggarty, "System alignment using the Talbot effect," in *Adaptive Optics and Optical Structures*, vol. 1271, pp. 346-355, 1990.
- [113] 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, no. 3, pp. 901-904, Mar. 1997.
- [114] Y. Defosse, "Conception et réalisation de micro-optiques pour les interconnexions optiques : applications dans le domaine des télécommunications," Rennes 1., 1997.
- [115] E. Quertemont, "Modélisation et réalisation de micro-optiques hybrides (diffractives et réfractives) destinées à un connecteur pour fibres optiques multiples coeurs," Rennes 1., 1999.
- [116] M. EL Bouz, "Etude et réalisation des éléments micro-optiques à plusieurs niveaux de phase," Université de Rennes I - Telecom Bretagne, 2001.
- [117] M. Kessels, "Conception, modélisation, développement et application d'un phototraceur massivement parallèle pour l'écriture directe de structures submicroniques," Institut Télécom-Télécom Bretagne, 2008.
- [118] M. Kessels and K. Heggarty, "Optical proximity correction for a versatile LCD based direct write maskless photoplotter," *Microelectronic Engineering*.
- [119] J. Paufler, S. Brunn, T. Körner, and F. Kühling, "Continuous Image Writer with improved critical dimension performance for high-accuracy maskless optical patterning," *Microelectronic Engineering*, vol. 57, pp. 31-40, Sep. 2001.
- [120] L. H. Erdmann, "MEMS-based lithography for the fabrication of micro-optical components," in *Proceedings of SPIE*, pp. 79-84, 2004.
- [121] Y. Gao, T. Shen, J. Chen, N. Luo, X. Qi, and Q. Jin, "Research on high-quality projecting reduction lithography system based on digital mask technique," *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, vol. 116, no. 7, pp. 303-310, Aug. 2005.
- [122] "Micronic Mydata - Pattern Generator solutions : www.micronic.se/." [Online]. Available: <http://www.micronic.se/>. [Accessed: 08-Jul-2010].
- [123] H. Martinsson, T. Sandstrom, A. Bleeker, and J. D. Hintersteiner, "Current status of optical maskless lithography," *Journal of Microlithography, Microfabrication, and Microsystems*, vol. 4, no. 1, pp. 011003-15, Jan. 2005.
- [124] D. Gil, R. Menon, X. Tang, H. I. Smith, and D. J. D. Carter, "Parallel maskless optical lithography for prototyping, low-volume production, and research," in *Papers from the 46th International Conference on Electron, Ion, and Photon Beam Technology and Nanofabrication*, vol. 20, pp. 2597-2601, 2002.
- [125] E. Bialic et al., "Phototraceur UV à micro-miroirs pour la réalisation de fonctions optiques intégrées et diffractives," presented at the JNOG 2008, Lannion, France., 2008.
- [126] A. Chan Yong, C. Carré, K. Heggarty, and D. Battarel, "Comparaison des microstructures optiques créées dans une photorésine et dans un matériau sol-gel hybride.," presented at the Journées de la Matière Condensée (12e), Troyes, France., 2010.
- [127] "Project Newton : www.projectnewton.com/." [Online]. Available: <http://www.projectnewton.com/index.html>. [Accessed: 28-Jun-2010].
- [128] J. Lourtioz et al., *Photonic crystals: towards nanoscale photonic devices*. Springer, 2008.
- [129] N. Dissaux, K. Heggarty, C. Carré, W. Wohlleben, A. Lvrinenko, and T. Schweizer, "Matériaux pour l'optique : caractérisation de structures de type cristaux photoniques obtenues par déposition colloïdales," presented at the Methodes et Techniques Optiques Pour L'industrie, Arcachon, France., 2007.
- [130] A. V. Lavrinenko et al., "Artificial Opals as Nanophotonic Materials for Optical Communication," in *9th International Conference on Transparent Optical Networks, 2007. ICTON'07*, vol. 2, 2007.
- [131] "www.phasicscorp.com : Adaptive optics, laser metrology, wavefront analysis: Phasics." [Online]. Available: <http://www.phasicscorp.com/>. [Accessed: 29-Jun-2010].

- [132] J. de Bougrenet de La Tocnaye, R. Chevallier, K. Heggarty, and Y. Defosse, "Dispositif de connexion pour fibres optique, multicoeur, à base d'éléments en espace libre," U.S. Patent FR 96 12240.
- [133] J. H. Strickler and W. W. Webb, "Three-dimensional optical data storage in refractive media by two-photon point excitation," *Optics Letters*, vol. 16, no. 22, pp. 1780-1782, Nov. 1991.
- [134] R. Borisov et al., "Fabrication of three-dimensional periodic microstructures by means of two-photon polymerization," *Applied Physics B: Lasers and Optics*, vol. 67, no. 6, pp. 765-767, Dec. 1998.
- [135] J. Serbin et al., "Femtosecond laser-induced two-photon polymerization of inorganic organic hybrid materials for applications in photonics," *Optics Letters*, vol. 28, no. 5, pp. 301-303, Mar. 2003.
- [136] T. Haist, M. Reicherter, M. Wu, and L. Seifert, "Using Graphics Boards to Compute Holograms," *Computing in Science and Engg.*, vol. 8, no. 1, pp. 8-13, 2006.
- [137] N. Masuda, T. Ito, T. Tanaka, A. Shiraki, and T. Sugie, "Computer generated holography using a graphics processing unit," *Optics Express*, vol. 14, no. 2, pp. 603-608, 2006.
- [138] L. Ahrenberg, P. Benzie, M. Magnor, and J. Watson, "Computer generated holography using parallel commodity graphics hardware," *Optics Express*, vol. 14, no. 17, pp. 7636-7641, 2006.
- [139] D. A. Pomet, M. G. Moharam, and E. B. Grann, "Limits of scalar diffraction theory for diffractive phase elements," *Journal of the Optical Society of America A*, vol. 11, no. 6, pp. 1827-1834, 1994.
- [140] J. Bengtsson, "Design of fan-out kinoforms in the entire scalar diffraction regime with an optimal-rotation-angle method," *Applied Optics*, vol. 36, no. 32, pp. 8435-8444, Nov. 1997.
- [141] J. Kaiser, E. Quertemont, and R. Chevallier, "Light propagation in the pseudo-paraxial Fresnel approximation," *Optics Communications*, vol. 233, no. 4, pp. 261-269, Apr. 2004.
- [142] S. Mellin and G. Nordin, "Limits of scalar diffraction theory and an iterative angular spectrum algorithm for finite aperture diffractive optical element design," *Optics Express*, vol. 8, no. 13, pp. 705-722, Jun. 2001.

8 Liste des abréviations

2PP	Two Photon Polymerisation
AsGa	Arséniure de Gallium
ASIC	Application Specific Integrated Circuit
BOASLM	Binary Optically Addressed Spatial Light Modulator
CCD	Charge-Coupled Device
CGH	Computer Generated Hologramme
CEA	Commissariat à l'Énergie Atomique
CIFRE	Convention Industriel de Formation par la Recherche
CL	Cristaux Liquide
CMOS	Complementary metal-oxide-semiconductor
CNET	Centre Nationale des Études en Télécommunications
CRAFT	Cooperative Research for Technology
CRT	Cathode Ray Tube
DBS	Direct Binary Search
DE	Diffusion d'Erreur
DMD	Digital Micro-mirror Device
DOE	Diffractive Optical Element
DVD	Digital Versatile Disk
EOD	Élément Optique Diffractif
ENST	École Nationale Supérieure des Télécommunications
EU	États Unis
FFT	Fast Fourier Transform
FLC	Ferroelectric Liquid Crystal
GET	Groupe des Écoles de Télécommunication
GPS	Global Positioning System
HSO	Hologramme Synthétisé par Ordinateur
IFTA	Iterative Fourier Transform Algorithm
IR	Infra-rouge
LCD	Liquid Crystal Display
LCOS	Liquid Crystal on Silicon
LED	Light Emitting Diode
LZH	Laser Zentrum Hannover
MEMS	Micro electro-mechanical system
MOEMS	Micro-Optical Electro-Mechanical System
MSL	Modulateur Spatiaux de Lumière
OASLM	Optically Addressed Spatial Light Modulator
ONERA	Office National d'Études et de Recherches Aéronautiques
PC	Personal Computer
PME	Petite ou Moyenne Entreprise

RBD	Recherche Binaire Directe
RIE	Reactive Ion Etch
SLM	Spatial Light Modulator
USB	Universal Serial Bus
UV	Ultra-violet

Annexe 1 - C.V. de Kevin Heggarty

Informations personnelles

Né le 6 décembre 1964 à Salisbury (Hararé), Rhodésie (Zimbabwe).

Nationalité Britannique.

Marié, cinq enfants.

Bilingue Anglais/Français.

Adresse professionnelle

Département Optique,

Telecom Bretagne,

Technopôle Brest-Iroise,

29238 Brest cedex.

France.

Tél 02 2900 1205

Fax 02 2900 1025

kevin.heggarty@telecom-bretagne.eu

Adresse personnelle

Pen Mez Hir,

29290 Lanrivoaré.

France.

Études

- 1988-91 **Doctorat** à l'Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications de Paris sur
« Une implantation opto-électronique d'un réseau de neurones formels »,
- 1987-88 **Master of Science (MSc)** en Télécommunications et Systèmes d'Information à
l'université d'Essex (Grande Bretagne),
- 1984-87 **Bachelor of Arts (BA)** en Sciences Naturelles (physique) à l'université de
Cambridge (Grande Bretagne),
- 1976-83 O et A levels (Baccalauréat) à Nunthorpe Grammar School, York (Grande Bretagne).

Expériences professionnelles

Depuis 1997 Maître de Conférence à Telecom Bretagne,

2007 Co-fondateur de l'entreprise Holotetrix (prototypage de micro-optiques),

2002-03 Chercheur invité (séjour sabbatique) à l'université d'Edimbourg (GB) et au sein de
l'entreprise CRLOpto Ltd, spécialiste de micro-écrans à cristaux liquides
ferroélectriques (LCoS),

1995-97 Ingénieur de Recherche à l'ENST Bretagne responsable de l'installation,
le fonctionnement et la valorisation d'une salle blanche pour la fabrication d'éléments
micro-optiques,

1992-95 Chercheur post-doctoral à l'ENST Bretagne sur les réseaux de neurones optiques,

1992 Chercheur post-doctoral à l'ENST Paris sur le calcul et réalisation d'hologrammes
numériques,

- 1991-92 Professeur de Mathématiques (Terminales A,C et D) au Lycée du Sacré Coeur, N'Djamena, Tchad.
- 1983-84 Développeur informatique à l'université de York (GB) de logiciels pour l'enseignement de la physique et de la chimie en lycée.

Distinction :

Lauréat du prix GET et de la fondation Louis Leprince Ringuet 2006 pour le projet de création de la société Holotetrix.

Sociétés savantes :

Membre de la Société Française de l'Optique (SFO)
Membre de l'European Optical Society (EOS)

Domaines d'expertise scientifique :

- La modélisation et fabrication de micro-optiques diffractives et leurs applications, particulièrement aux télécommunications optiques.
- Les technologies et applications des modulateurs spatiaux de lumière à cristaux liquides et micro-miroirs: commutation optique, hologrammes reconfigurables, pincettes optiques, photo-inscription massivement parallèle ...
- Les télécommunications optiques.
- Le traitement optique de l'information (reconnaissance des formes).

Annexe 2 - Encadrement Doctoral

Thèses de doctorat encadrés

- Etude et réalisation d'éléments micro-optiques à plusieurs niveaux de phase, par Marwa Elbouz, début thèse novembre 1997, soutenue le 29 mars 2001 à Telecom Bretagne. Encadrement 100%.
- La caractérisation de front d'onde dans un système de propagation à multi-illumination gérée par un SLM, par Alexandre Mazine, début thèse octobre 2000, soutenue le 5 janvier 2006 à Telecom Bretagne. Encadrement 100%.
- Conception, modélisation, développement et application d'un phototraceur massivement parallèle pour l'écriture directe de structures submicroniques, par Mélanie Kessels, début thèse novembre 2005, soutenue le 14 avril 2008. Encadrement 100%.
- Photo-inscription et caractérisation de nanostructures diffractants de type cristaux photoniques, par Nolwenn Dissaux, début thèse octobre 2006, soutenance prévue 2010. Encadrement 75% (co-encadrante Christiane Carré).
- Reconnaissance et analyse automatique, temps réel de signalisation routières optiques, par Jérôme Ninot (thèse CIFRE), début thèse octobre 2006, soutenance prévue fin 2010. Encadrement académique 100%.
- Conception, fabrication par phototraçage parallèle et duplication d'éléments diffractifs, par Emilie Bialic, début thèse octobre 2007, soutenance prévue fin 2010. Encadrement 50% (co-encadrant Jean-Louis de Bougrenet).
- Développement et application d'un photo-traceur massivement parallèle pour l'écriture directe de structures sub-microniques, par Charbel Nassour, début thèse octobre 2008, soutenance prévue 2011. Encadrement 100%.
- Développement et mise au point des procédés et matériaux de recopie par nano-embossage de structures optiques diffractives, par Aurelie Yong, début thèse novembre 2009, soutenance prévu 2012. Encadrement 50%

Chercheurs Post-doctoral

- Développement d'un phototraceur multi-application à écriture directe massivement parallèle, par Carole Moussu dans le cadre du projet européen « DRAWMAP » (Direct Parallel-Write Multi-Application photoplotter) de février 1999 à août 2002.

Master Recherche, DEA, Fin d'études d'ingénieur, MSc, Diplomarbeit ...

- Développement de la phase d'apprentissage dans une implantation toute optique d'une carte auto-organisée de Kohonen, par Ezaquiel Dario Carpio Perez (projet fin d'études ingénieur Universidad Politécnica de Valencia, Espagne) juin 1994.
- Préparation de fichiers de phototraçage de structures diffractives en format Gerber RS-274D, par Rashid Zlaoui (BSc, University College London), septembre 1994.
- Réalisation d'éléments micro-optiques à plusieurs niveaux, par Marwa Elbouz (DEA Université Grenoble), juin 1997.
- Contribution to the development of a versatile, high plot rate parallel-write photoplotter : « position detection module », par Andreas Weber (Diplomarbeit Fachhochschule Leipzig), décembre 1999.

- Calibrage, caractérisation et mise au point d'un phototraceur. Fabrication de masques, par Estibaliz Gonzalez (fin d'études de Mastère Spécialisé), septembre 2004.
- Positionnement et reconnaissance dynamique en environnement routier par traitement d'images temps réel, par Jérôme Ninot (fin d'études d'ingénieur), septembre 2004.
- Modélisation et application de corrections d'effet de proximité pour un phototraceur massivement parallèle, par Mélanie Kessels (DEA Université Liège), juillet 2005.
- Investigation, conception, montage et vérification d'un système de transmission de datacommunications optiques pédagogique pour des applications courte distance, par Gaizka Alberdi, (fin d'études de Mastère Spécialisé), septembre 2005.
- Caractérisation structurelle et fonctionnelle de structures diffractantes submicroniques, par Nolwenn Dissaux (fin d'études d'ingénieur), septembre 2006.
- Amélioration et développement d'une électronique de commande et de logiciels de pilotages pour des phototraceurs à base de micro-écrans LCD et DMD, par Laurent Gandillon (Master), août 2007.
- Proximity Effect Compensation in the calculation of diffractive optical elements, par Gabriel Botero, (MSc, Universidad Nacional de Colombia), février 2008.
- Modeling of the output beam of a laser diode bar and its transformation with refractive and diffractive micro-optics, par John Restrepo (MSc, Universidad Nacional de Colombia), mars 2009.

Autres stages et projets

Encadrement de nombreux stages/projets de fin d'études en Maîtrise, Licence, IUT, BTS dont Céline Lijour (1998), Geraldine Caugant (1999), Evelyne Bazantay (2001), Fanny Le Lay (2007), Nicolas Leblanc (2009) Sylvain Prime (2009) ...

Annexe 3 - Projets de Recherche

Projets et Contrats de recherche

Projets Européens

HICOPOS : « Highly Integrated and Compact Optical Processor for On-Board Systems »

- Projet ESPRIT III de 1992 à 1995 (HICOPOS – 7050)
- 5 partenaires (France et Grande Bretagne)
- Participant technique à l'ENST Bretagne (modulateurs spatiaux de lumière à cristaux liquides)

DRAWMAP : « Direct Parallel-Write Multi-Application photoplotter ».

- Projet CRAFT de février 1999 à février 2001 (BRST-CT98-5524)
- Responsable global («Prime») technique et administratif du projet .
- 7 partenaires (France, Grande Bretagne, Allemagne, Autriche, Suède)
- Budget total du projet 540k€
- Budget ENST Bretagne 270k€

LASSAR : « Large Area Sub-wavelength Surface Analysis and Reconstruction »

- Projet CRAFT de juillet 2001 à juillet 2004. (G6ST-CT-2001-50081)
- Responsable technique et administratif du projet pour l'ENST Bretagne.
- 7 partenaires (France, Grande Bretagne, Allemagne, Israël)
- Budget ENST Bretagne 124k€

NEWTON : « Enabling Technologies for 3D Nano Photonics: New Materials and Process Technology for Real 3D Integrated Optical Circuits, Photonic Band Gap Devices and Photonic Crystals ».

- Projet STREP de janvier 2006 à décembre 2008.
- Responsable technique et administratif du projet pour l'ENST Bretagne et responsable de la tâche (workpackage) caractérisation.
- 6 partenaires (France, Allemagne, Grande Bretagne et Danemark).
- Budget total 2,8M€.
- Budget ENST Bretagne 360k€.

EPHOTONONE/EPHOTONONE+ : « Optical Networks : Towards Bandwidth Manageability and Cost Efficiency »

- Projet NoE (Réseau d'excellence Européen) de février 2004 à février 2008
- Participation aux tâches enseignement (WP-T) et réseaux domestiques (VD-H).
- Responsable d'un module du «Mastère virtuel ».
- Responsable de l'école d'été 2007
- 41 partenaires (voir www.e-photon-one.org)

BONE: « Building the Future Optical Network in Europe »

- Projet NoE (Réseau d'excellence Européen) de janvier 2008 à janvier 2011 (FP7-ICT-2007-1)
- Responsable tâche enseignement (WP02)
- Enseignant et architecte de l'enseignement à distance lors du « Master School » à Mons (Belgique) en octobre 2008 et Cracovie (Pologne) 2009.
- 49 partenaires (voir www.ict-bone.eu)
- Budget total 3,8M€.
- Budget GET 205k€.

Projets Région Bretagne

PRINT : « Phototraceur Rapide pour l'optique diffractive et INTégrée »

- Projet PRIR N°2266 de février 2006 à février 2009
- Responsable global technique et administratif du projet
- 4 partenaires (Telecom Bretagne, Université Bretagne Sud, Centre Commun Lannionais d'Optique et la société MicroModule)
- Budget 107k€

HOLLAZ « Développement de micro-optiques permettant la mise en forme de faisceau laser »

- Projet d'octobre 2008 à avril 2010
- Responsable technique pour Telecom Bretagne

- 4 partenaires (Telecom Bretagne, Université Bretagne Sud et les sociétés Laseo et Holotetrix)
- Budget projet 192k€

Projets Nationaux

OSEO-HOLOTRIX (Réplication par nano-embossage d'éléments optiques diffractifs)

- Projet OSEO « Innovation - aide au transfert de technologie », No A070206E-AT
- Responsable technique et administratif du projet
- Avril 2007 à janvier 2009
- Budget alloué 64k€

Contrats Industriels

OPTILSYS – « Energy and cost-efficient direct imaging system for use in the micro-mechanical and electronics production industries »

- Avec la société allemande MIVA Technologies GmbH (www.mivatec.com/)
- Responsable technique et administratif pour Telecom Bretagne
- Mars 2007 à mai 2008
- Budget 53k€

NANOPLOT : « Évaluation, caractérisation et pilotage de modulateurs spatiaux de lumière à cristaux liquides pour des applications d'affichage temps réel de réseaux de diffraction reconfigurables »

- Avec la société française Holotetrix (www.holotetrix.com)
- Responsable technique et administratif pour Telecom Bretagne
- Novembre 2008 à octobre 2009
- Budget 20k€

CIFRE Jérôme Ninot

- Thèse CIFRE avec la société française « Induct » (www.inductsystem.com)
- Septembre 2006 à septembre 2009

Vie Scientifique

Créations d'entreprises

- Participation (actionnaire fondateur) à la création en 2001 de l'entreprise OPTOGONE, fabricant de composants et systèmes optiques à base de cristaux liquides pour les télécommunications optiques.
- Co-fondateur en octobre 2007 de la société HOLOTRIX, spécialisée dans la conception, fabrication et commercialisation de micro-optiques diffractives.

Organisation Conférences

- Responsable communication de la conférence « Ferroelectric Liquid Crystals » à Brest en juillet 1997.
- Responsable communication de la conférence « STREON » à Brest en 2005,
- Président de l'école d'été ePhotonONE+ à Brest en juillet 2007.

Annexe 4 - Publications et Communications

Articles de revue avec comité de lecture

1. HEGGARTY Kevin, CHEVALLIER Raymond, **Optical implementation of an improved Hopfield-like retrieval algorithm.** Optics communications, March 1992, vol. 88, n° 2, pp. 91-95
2. DUVILLIER Jérôme, KILLINGER Michael, HEGGARTY Kevin, YAO Koffi, DE BOUGRENET DE LA TOCNAYE Jean-Louis, **All-optical implementation of a self-organizing map : a preliminary approach.** Applied optics, 1994, vol. 33, n° 2, pp. 258-266.
3. HEGGARTY Kevin, DUVILLIER Jérôme, CARPIO PEREZ E.D., DE BOUGRENET DE LA TOCNAYE Jean-Louis, **All-optical implementation of a self-organizing map : generalization and taxonomy capability assesment.** Applied optics, 1995, vol. 34, n° 1, pp. 8167-8175.
4. BARGE Michel, HEGGARTY Kevin, CHEVALLIER Raymond, **Two methods of reducing the dynamic range of a holographic filter.** Applied optics, july 1996, vol. 35, n° 20, pp. 3880-3886.
5. BARGE Michel, HEGGARTY Kevin, IDAN Yitzak, CHEVALLIER Raymond, **64-Channel correlator implementing a Kohonen-like neural network for handwritten-digit recognition.** Applied optics, august 1996, vol. 35, n° 23, pp. 4655-4665
6. PRIMOT Jérôme, SOGNO Ludovic, FRACASSO Bruno, HEGGARTY Kevin, **Wavefront sensor prototype for industrial applications based on a three-level phase grating.** Optical engineering, march 1997, vol. 36, n° 3, pp. 901-904
7. HEGGARTY Kevin, CHEVALLIER Raymond, **Signal window minimum average error algorithm for computer-generated holograms.** Journal of the Optical Society of America A - Optics image science and vision, 1998, vol. 15, n° 3, pp. 625-635
8. EL BOUZ - AL FALOU Marwa, HEGGARTY Kevin, **Signal window minimum average error algorithm for multi-phase level CGH.** Optics communications, 2000, vol. 180, pp. 21-28
9. GUÉRINEAU Nicolas, HARCHAOUI B., PRIMOT Jérôme, HEGGARTY Kevin, **Generation of achromatic and propagation-invariant spot arrays by use of continuously self-imaging gratings.** Optics letters, april 2001, vol. 26, n° 7, pp. 411-413
10. HOSSACK William, THEOFANIDOU Eirini, CRAIN Jason, HEGGARTY Kevin, BIRCH Martin, **High-speed holographic optical tweezers using a ferroelectric liquid crystal microdisplay.** Optics express, august 2003, vol. 11, n° 17, pp. 2053-2059
11. HEGGARTY Kevin, FRACASSO Bruno, DE BOUGRENET DE LA TOCNAYE Jean-Louis, BIRCH Martin, KRUERKE D., **Silicon backplane ferroelectric liquid crystal spatial light modulator for uses within an optical telecommunications environment.** Ferroelectrics, 2004, vol. 312, pp. 39-55
12. LOUKINA Tatiana, MASSENOT Sébastien, CHEVALLIER Raymond, HEGGARTY Kevin, SHIGAPOVA N.M., SKOCHILOV A.F., **Volume diffraction gratings for optical telecommunications applications: design study for a spectral equalizer.** Optical engineering, 2004, vol. 43, n° 11, pp. 2658-2665
13. KESSELS Mélanie, EL BOUZ - AL FALOU Marwa, PAGAN Robin, HEGGARTY Kevin, **Versatile stepper based maskless microlithography using a liquid crystal display for direct-write of binary and multi-level microstructures .** Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS (JM3), july 2007
14. KESSELS Mélanie, HEGGARTY Kevin, **Optical proximity correction for a versatile LCD based direct write maskless photoplotter.** Microelectronic engineering, may 2009
15. LALLANA Pedro, VAZQUEZ Carmen, VINOUEZ Bruno, HEGGARTY Kevin, MONTERO David, **Multiplexer and Variable Optical Attenuator Based on PDLC for Polymer Optical Fiber Networks.** Molecular crystals and liquid crystals, May 2009, vol. 502, pp. 130-142
16. DISSAUX Nolwenn, HEGGARTY Kevin, CARRÉ Christiane, WOHLLEBEN Wendel, LAVRINENKO Andrei, SCHWEIZER Thorsten, **Matériaux pour l'optique : caractérisation de structures de type cristaux photoniques obtenues par déposition colloïdales.** Contrôles Essais Mesures, octobre 2008, n° 25

17. KESSELS Mélanie, NASSOUR Charbel, GROSSO Philippe, HEGGARTY Kevin **Direct write of optical diffractive elements and planar waveguides with a digital micromirror device based UV photoplotter**. Optics communications, 2010.

Communications dans une conférence à comité de lecture

18. CHEVALLIER Raymond, SIRAT Gabriel, HEGGARTY Kevin, MARUANI Alain **Frequency multiplexed raster scheme of an optical neural network: shift invariant recognition**. IOC Topical Meeting on Optical Computing, août, Toulon.
19. CHEVALLIER Raymond, SIRAT Gabriel, HEGGARTY Kevin, MARUANI Alain **Frequency multiplexed raster scheme of an optical neural network: shift invariant recognition**. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 1989, vol. 963, pp. 522-526
20. HEGGARTY Kevin, CHEVALLIER Raymond, IDAN Yitzak, SIRAT Gabriel, **An opto-electronic implementation of a neural network**. *Optical Science and Engineering, La Haye, 12-15 mars 1990*, Proceedings of SPIE, 1990, n° 1281, pp. 136-144
21. IDAN Yitzak, CHEVALLIER Raymond, HEGGARTY Kevin, SIRAT Gabriel, **Invariance in an opto-electronic implementation of neural networks**. *Optical Science and Engineering, La Haye, 12-15 mars 1990*, Proceedings of SPIE, 1990, vol. 1281, pp. 145-150
22. CHEVALLIER Raymond, LE FALHER Eric, HEGGARTY Kevin, **System alignment using the Talbot effect**. *Optical Science and Engineering, La Haye, 12-15 mars 1990*, Proceedings of the SPIE, 1990, vol. 1281, pp. 346-355
23. SIRAT Gabriel, CHEVALLIER Raymond, HEGGARTY Kevin and IDAN Yitzak, **Lenslet arrays for optical processing**, *Optical Science and Engineering, La Haye, 12-15 mars 1990, Proceedings of the SPIE*, 1990, vol. 1281.
24. HEGGARTY Kevin, DUVILLIER Jérôme, DE BOUGRENET DE LA TOCNAYE Jean-Louis, **Experimental realization of an all-optical self-organizing map**. Optical Computing, Edinburgh, 1994, pp. 175-176.
25. PROVOST J.N., SOGNO L., HEGGARTY Kevin, FRACASSO Bruno, **Wavefront analyser for industrial application**. International Symposium Optronics & Defence, 1996.
26. HEGGARTY Kevin, FRACASSO Bruno, LETORT Cedric, J.-L. DE BOUGRENET, BIRCH Martin and KRUERKE Daniel, **Silicon backplane Ferroelectric liquid crystal spatial light modulator for uses within an optical telecommunications environment**, Ferroelectric Liquid Crystals, Dublin, 24-29 August, 2003.
27. KESSELS Mélanie, HEGGARTY Kevin, **Écriture directe de microstructures à 2 et 3 dimensions par un phototraceur massivement parallèle utilisant un micro-écran comme masque reconfigurable**. INTERCONEX/IMAP : 16ème Forum de l'interconnexion et du packaging, 27-28 septembre, Besançon, France, 2006.
28. LAVRINENKO Andrei, LEYRER Reinhold, WOHLLEBEN Wendel, HEGGARTY Kevin, DISSAUX Nolwenn, BOYLE Mark, KIYAN Roman, NEUMEISTER Andre, **Artificial Opals as Nanophotonic Materials for Optics Communications**. 9th International Conference on Transparent Optical Networks, July 1-5, Rome, Italy, 2007, pp. 208-211.
29. LAVRINENKO Andrei, LEYRER Reinhold, WOHLLEBEN Wendel, DISSAUX Nolwenn, HEGGARTY Kevin, BOYLE Mark, KIYAN Roman, NEUMEISTER Andre, Progress in photonic metamaterials based on artificial opals, ICONO/LAT 2007, 28 May - 01 June 2007, Minsk, Belarus, talk I10/II-1.
30. LALLANA Pedro, VAZQUEZ Carmen, MONTERO David, VINOUEZ Bruno, HEGGARTY Kevin, **Dual 3X1 multiplexer for POF networks**. ICPOF 2007 : International Conference on Plastic Optical Fibers, September 10-12, Torino; Italy, 2007.
31. BIALIC Emilie, KESSELS Mélanie, HARDY Isabelle, GROSSO Philippe, HEGGARTY Kevin, TORRES Rafael, PELLAT-FINET Pierre, **Phototraceur UV à micro-miroirs pour la réalisation de fonctions optiques intégrées**

et diffractives. JNOG 2008 : 27^{èmes} journées nationales d'optique guidée, 20-22 octobre, Lannion, France, 2008.

32. NINOT Jérôme, TAREL Jean-Philippe, GAVRILOVIC Thomas, SMADJA Laurent, HEGGARTY Kevin, **Amélioration et optimisation d'algorithme pour l'extraction de marquages routiers.** Première conférence francophone sur les technologies de l'information, de la communication et de la géolocalisation dans les systèmes de transports, 29 juin - 01 juillet 2009, St Quay Portrieux, France, 2009.

Conférence sans acte ou actes à diffusion limitée

32. CHEVALLIER Raymond, SIRAT Gabriel, HEGGARTY Kevin and IDAN Yitzak, **Système opto-électronique de neurones formels**, Fonctions Optiques dans l'Ordinateur, Toulouse, octobre 1989.
33. HEGGARTY Kevin et CHEVALLIER Raymond, **Implantation opto-électronique d'un associateur de type neuronal**, 7e journées d'étude - optique dans l'ordinateur, Brest, 19-20 septembre 1991.
34. BARGE Michel, CHEVALLIER Raymond, HEGGARTY Kevin, MARUANI Alain, OUDAR Jean-Louis, PALMIER J-F, SAINSON S., **Etude et réalisation de composants optiques diffractifs d'interconnexion**, *Physique des systèmes de traitement optique de l'information, Toulouse, juillet 1993.*
35. BARGE Michel, CHEVALLIER Raymond, HEGGARTY Kevin, **Comparaison de deux méthodes d'amélioration d'un montage de type corrélateur multicanal**, in OS/SFO/SEE Optique et Information, Mulhouse, France, octobre 1995.
36. DEFOSSE Yves, HEGGARTY Kevin, QUERTEMONT Eric, CHEVALLIER Raymond, **Réalisation et caractérisation de matrices de microlentilles pour le traitement optique du signal**. International Symposium on Optronics and Defense, December 3-5, Paris, 1996.
37. PRIMOT Jérôme, SOGNO Ludovic, HEGGARTY Kevin, FRACASSO Bruno, **A wavefront sensor for industrial applications based on a three-level phase grating**, International Symposium on Optronics and Defense, December 3-5, Paris, 1996.
38. HEGGARTY Kevin, GONZALEZ GARCIA Estibaliz, SIEGEL Christian, GROSSO Philippe, **Phototraceur massivement parallèle pour la photoinscription directe dans l'ultra-violet**. FOTON 2004 (1er séminaire du Groupement d'Intérêt Scientifique dédié aux Fonctions Optiques pour les Télécommunications), 2004, pp. 37-39.
39. DISSAUX Nolwenn, HEGGARTY Kevin, CARRE Christiane, LAYRER Reinhold, WENDEL Wolleben, LAVRINENKO Andrei, BOYLE Mark, **Caractérisation de structures de type cristaux photoniques obtenues par dépôt colloïdale**, Methodes et Techniques Optiques Pour L'industrie, Arachon, November 2007

Brevet

40. DE BOUGRENET DE LA TOCNAYE Jean-Louis, CHEVALLIER Raymond, HEGGARTY Kevin, DEFOSSE Yves, **Dispositif de connexion pour fibres optique, multicoeur, à base d'éléments en espace libre**. Propriété Institut TELECOM, TELECOM Bretagne. FR 96 12240, 08/10/1996

Extension aux E.U. **Connection device for multiple-core optical fibres based on optical elements in free-space**, US Patent 6,078,780,2000 20th June 2000

Annexe 5 - Activités d'Enseignement

Telecom Bretagne (actuellement)

- Responsable de l'UV de 3e année « Datacommunications Technologies and Applications » (63hrs) : module à plus de 70% en anglais incluant (depuis 8 ans) un déplacement des élèves pendant une semaine au département d'ingénierie électronique de l'Université de Cambridge (GB).
- Responsable de l'UV Optical Telecommunications en Master of Science, (21hrs, UV entièrement en anglais)
- Responsable du module d'intersemestre « Techniques Photographiques » (21hrs)
- Participation aux enseignements de Telecom Bretagne à tous les niveaux de formation: première, deuxième et troisième année de la formation ingénieur, Master of Science (MSC), Ingénieur en Partenariat (« FIP » par alternance), Master Recherche, Formation Continue :
 - Cours de télécommunications optiques en MSC
 - Cours de rappels d'optique, matériaux photosensibles, capteurs optiques et introduction aux télécommunications optiques en 2e année
 - Cours de datacommunications optiques, photométrie, colorimétrie, holographie et le système visuel humain en 3e année
 - Cours d'optique générale et photo-détection visible et infra-rouge en formation continue
 - Cours d'anglais scientifique en 3e année, en FIP et en Formation Continue
 - Cours d'holographie en Master Recherche (DNM « PHYPHOTON »)
 - Travaux dirigés en électromagnétisme et ondes en 1ère année
 - Travaux dirigés sur la polarisation, cohérence et télécommunications optiques en 2e année
 - Travaux dirigés en conception de liaison de télécommunications optiques en MSC et FIP
 - Travaux dirigés sur les multiplexeurs optiques (étude de brevet) en 3e année
 - Travaux pratiques sur la rétrodiffusion, filtre de Bragg et amplification optique en MSC
 - Travaux pratiques en photographie argentique et numérique en 2e année (intersemestre)
 - Travaux pratiques en salle blanche 3e année
 - Travaux pratiques sur une liaison vidéo en datacommunications optiques et la simulation de liens datacommunications optiques en 3e année
 - Travaux pratiques sur l'optique géométrique et la photodétection en Formation Continue

Telecom Bretagne (par le passé)

- Créateur et responsable (2000 à 2007) du Mastère Spécialisé ERTDO (Master Européen en Réseaux de Télécommunications et Datacommunications optiques) avec ~50% des cours en anglais.
- Membre des comités de pilotage des projets du semestre 1 (Introduction aux Grands Systèmes) et semestre 4 (projet d'ingénieur).
- Enseignements :
 - Cours en holographie numérique, réseaux de neurones optiques en 3e année et DEA
 - Travaux pratiques en analyse de spectre et télécommunication optiques (2e année) en optique de Fourier, corrélation optique, calcul, fabrication et caractérisation de micro-optiques diffractives (3e année et DEA) et caractérisation de composants pour les télécommunications optiques (Formation Continue)

Projet d'élèves-ingénieurs à Telecom Bretagne

Depuis 1997, proposition et encadrement de très nombreux (plus de deux par année) projets d'élèves en 1ère, 2e et 3e année de formation d'ingénieur, en MSC, Mastère Spécialisé et DEA/DNM. Très souvent ces projets se sont déroulés en lien avec un partenaire industriel. Quelques exemples:

- Alignement de micro-optiques - société ARMECA
- Coupleur diffractif 1 vers N - France Telecom R&D
- Fabrication de composants diffractifs - REOSC
- Phototraceur prototype pour la fabrication de structures submicroniques - Mivatec GmbH
- Préparation de données vectorielles pour un phototraceur parallèle - PM GmbH
- Reconnaissance automatique de panneaux routiers à partir de flux vidéo - Dotmobil
- Établissement et exploitation d'une couche "signalisation routière" dans les bases de données géolocalisées - Viametris
- Analyse de fécondité des oeufs de poules par traitement d'images – E-CAT
- Réplication par embossage d'hologrammes numériques – Holotetrix.

International

- Enseignant en Télécommunications Optiques dans le cadre du European Student Meetings (ERM), à Leipzig (2006) et Lille (2007),
- Intervenant tous les ans depuis 4 ans à l'Université Carlos III de Madrid (Espagne), en Simulation de Réseaux de Télécommunications Optiques et Anglais Scientifique,
- Intervenant dans l'école d'été du Réseaux d'excellence Européen (BONE) à Mons (Belgique) en 2008.

Annexe 6 - Sélection de publications scientifiques

