

Saint-Etienne le 20 janvier 2004

Monsieur le Président
Société Française d'Optique
Bat 503 IOTA
Orsay

Monsieur le Président,

La Société française d'Optique et son Président m'ont confié en septembre 2002 la tâche de coordonner la rédaction du « Livre blanc sur l'optique : bilan des forces et faiblesses de l'optique en France », pour le compte de la Direction de la Technologie du Ministère de la Jeunesse, de l'Education et de la Recherche.

Le Conseil d'Administration avait proposé de structurer la rédaction suivant sept thèmes et des collègues ont bien voulu accepter de prendre en charge ces thèmes et de réunir des experts, de recueillir leur avis et de faire une synthèse.

Ce travail est maintenant achevé. Il a demandé beaucoup d'efforts de la part de tous les collègues de l'enseignement, de la recherche, de l'industrie et des structures chargées du transfert de technologie qui ont bien voulu bénévolement prendre sur leur temps pour se consacrer à un effort de réflexion dans l'intérêt de la communauté des opticiens.

Je vous prie d'agréer, Monsieur le Président, l'expression de mes sentiments les meilleurs

Professeur Jean-Pierre Goure



DIRECTION DE LA TECHNOLOGIE
Affaire suivie par : Alain BRUN
Département Technologies de l'Information et de
la Communication (DTA3)
Tél. : 01 55 55 87 98 - Fax 01 55 55 98 73
Courriel : alain_brun@technologie.gouv.fr

Paris, le 11 OCT. 2002

16/10/2002

Objet : consultation destinée à établir le bilan des forces et des faiblesses de l'Optique en France

Madame, Monsieur,

La Direction de la Technologie souhaite pouvoir disposer d'un bilan national permettant de connaître les forces et les faiblesses relatives à l'optique en France, afin de l'aider ensuite à piloter son action vis-à-vis des structures de transfert de technologie, d'aide à la valorisation jusqu'à la formation et la recherche.

Le rapport pourrait se décomposer en quatre parties :

- un état actuel des recherches académiques dans le domaine, avec une description des grandes orientations pour le futur ;
- une analyse comparable relative à l'industrie de l'optique et à la recherche industrielle qui lui est liée ;
- une présentation des formations existantes et des emplois et besoins attendus par le tissu industriel ;
- une synthèse des recommandations proposées.

Il faudra également faire ressortir dans ces différentes parties la place particulière de l'Optique dans le domaine des STIC.

Votre réponse devra m'être adressée en deux exemplaires et devra me parvenir avant le 21 octobre 2002 au soir. Elle devra comporter :

- une annexe technique présentant la prestation ;
- une annexe financière présentant le budget nécessaire à la réalisation de ce «livre blanc sur l'optique» avec une ventilation par postes budgétaires ;
- une rapide présentation de votre organisme ainsi que le CV du responsable de la conduite de ce travail.

Restant à votre disposition pour toute information complémentaire, je vous prie d'agréer, Madame, Monsieur, l'expression de mes sentiments distingués.

Alain BRUN
Chargé de Mission

Remerciements

La rédaction de ce rapport a été un large travail collectif. Comme tout travail bénévole il a occasionné une surcharge lourde pour la plupart des experts qui ont bien voulu participer à cette rédaction.

Je remercie tout d'abord et particulièrement les responsables de groupes qui ont largement pris sur leur temps pour venir aux réunions, pour contacter les experts et pour rédiger les chapitres dont ils étaient responsables.

Un remerciement aussi à tous les experts qui ont bien voulu écrire des rapports ou répondre aux questions posées ou encore relire et corriger les textes.

Un remerciement enfin à Françoise Chavel (SFO) pour son aide technique.

Documents antérieurs sur l'optique en France

« L'optique » -Rapport au Président de la Mission Scientifique et Technique -Jean Jerphagnion (1985)

« De l'optique à la photonique » - Rapport du CADAS – rapport n°11

« Exploitation du rapport du CADAS de l'optique à la photonique » SFO Jean-Claude Fontanella (Mars 1993)

« Matériaux fonctionnels pour l'optique » extrait du cahier de synthèse matériaux. Editions du CNRS Novembre 1997

« Les acteurs de l'optique en France : laboratoires, entreprises et réseaux »- Rapport SFO établi à la demande du CNRS Roland Levy et Jean-Michel Jonathan (2000)

« L'enseignement de l'optique en France » Rapport du GIFO 2001

« Etude sur l'adéquation emploi/formation - secteur optique » AFPA et OpticsValley (Octobre 2002)

« La Biophotonique. Perspectives de développement » OpticsValley, Génopole et ADIT (Juin 2003)

LISTE DES COORDINATEURS et des EXPERTS

Coordonnateur : Jean-Pierre GOURE

Professeur émérite université de Saint-Etienne

Laboratoire TSI UMR CNRS 5516

Technologie de l'information et télécommunications (*Chapitre 3*)

Jean-Pierre HAMAIDE *Alcatel*

Christian MARZOLIN *Opticsvalley*

Claude ARTIGUE (Alcatel R&I, Marcoussis)

Alain BARTHELEMY (IRCOM, Limoges)

Pierre CHAVEL (LCFIO, Orsay)

Eric DELEVAQUE (Highwave, Lannion)

Jean-Pierre HUIGNARD (Thales Research & Technology)

Yves JAOUEN (ENST-Paris)

Suzanne LAVAL (IEF, Orsay)

Ariel LEVENSON (CNRS-LPN – Marcoussis)

Hervé MAILLOTTE (LOPMD – Besancon)

Jean-Jacques MEROLLA et Laurent LARGER (CNRS, Georgia-Tech Lorraine, Metz)

Gérard MONNOM (LPMC Université Nice)

Jean-Louis OUDAR (CNRS-LPN – Marcoussis)

Gilles PAULIAT (LCFIO, Orsay)

Philippe REFREGIER (Institut Fresnel, Marseille)

Richard RIZK (SIFCOM (ex-LERMAT), Caen))

Pierre SANSONETTI (Alcatel Fibre Optique, Conflans Ste Honorine)

Jean-Claude SIMON (ENSSAT – Lannion)

Patrick VANDAMME, Michel JOINDOT, Jacques ABIVEN (France Telecom R&D, Lannion)

Santé et science de la vie (*chapitre 4*)

Coordinateurs : **Claude BOCCARA** *ESPCI*

Jean-Louis MARTIN *Ecole Polytechnique*

Visualisation, Holographie, Traitement optique de l'image, Eclairage, Energie

(*Chapitre 5*)

Coordinateur : **Brigitte LOISEAUX** *Thales Research & Technology*

Visualisation:

Frédéric DELAUZIN (Thales Research & Technology)

Cécile JOUBERT(NEMOPTIC)

Pierre LEBARNY (Thales Research & Technology)

Jean Claude LEHUREAU(Thales Research & Technology)

Amaury LEJEMTEL (NEMOPTIC)

Eric MARCELLIN-DIBBON (Thomson)

Roger PIERI (Thomson)

Khaled SARAYEDDINE (Thomson)

Holographie:

Christiane CARRE MORLET-SAVARY (ENSC Mulhouse)

Bernard KRESS (Diffractive Solutions Strasbourg)

Olivier PARRIAUX (LTSI St-Etienne)

Pascal PICART (LAUM Le Mans)

Paul SMIGIELSKI (Club CEMOI)

Jean Louis TRIBILLON (DGA/DSP/SREA)

Traitement des images:

Pierre AMBS (ESSAIM Mulhouse)

Vincent LAUDE (LPMO Besançon)

Philippe REFREGIER (ENSPM Marseille)

Photodétection:

Jean Claude MULLER (L.Phase Strasbourg)

Défense et sécurité (Chapitre 6)

*Coordinateur : **Jean-Paul POCHOLLE** Thales Research &Technology*

Laurent BARRACO (DGA-CTA)

Pierre CHAVEL (LCFIO, Orsay)

Arnold MIGUS (LULI Ecole Polytechnique / IOTA)

Michel PAPUCHON (Thales Optronique)

Etienne PARIS (STTC DGA groupe optronique)

Emmanuel ROSENCHER (ONERA)

Claude RULLIERE (CEA-CESTA)

Michel SIRIEIX (SAGEM)

Procédés de fabrication (Chapitre 7)

*Coordinateur : **Dominique LAROCHE** Consultant*

1 Procédés liés à la production de pièces optiques

Hervé ARRIBART (Saint-Gobain recherche)

Claude AMRA (Institut Fresnel Marseille)

Jean-Jacques CONTET (Fichou-Président de l'AFOP (GIFO))

Guy COURBEBAILLISSE (Ecole supérieure de plasturgie-Oyonnax)

Chantal GERMAIN (Thales –Angénieux)

Alain Pierre LILOT (Saint-Gobain division cristaux et détecteurs)

Jean-Marie MACKOWSKI (INP-LYON)

Raymond MERCIER (LCFIO, Orsay)

Loic QUERE (ESSILOR centre de recherche)

Marie Françoise RAVET (LCFIO, Orsay)

Guillaume RAVEL (CEA / LETI/ IPC Grenoble)

Leanirith YEAN (ESSILOR centre de recherche)

2 Offre de l'optique dans les procédés de fabrication

Eric AUDOUART (LTSI St-Etienne)

Remy FABBRO (CLFA Arcueil)

Eric FOGARASSY (IREPA Laser Strasbourg)

Wolfgang KNAPP (CLFA Arcueil)

John LOPEZ (CELIA-PALA Bordeaux)

Serge MONNERET (ex ENSI Chimie Nancy-Institut Fresnel Marseille)

Jacky PORTRAT (BT/PCLB)

François SALIN (CELIA-PALA Bordeaux)

Composants et systèmes (Chapitre 8)

*Coordinateur : **Serge VALETTE** CEA /LETI*

Jean-Luc AYRAL(ex Photonetics Nettest)

Gilles BILLET (IFOTEC Voiron)

Jean Jacques CONTET (Fichou)

Véronique DENTAN (Nettest Photonetics)

Daniel GUYOT (Nanolase)

Yan HAENTIENS (DA-LightCom Group)

Pierre LABEYE (LETI)

Christian LERMINIAUX (ex Corning)

Jean-Michel MAISONNEUVE (CERT ONERA Toulouse)

Philippe NERIN (ex Fogale)

Henri PORTE (Photline Besançon)

Instrumentation de contrôle et de mesure (Chapitre 9)

*Coordinateur : **Hervé LEFEVRE** _Nettest*

Thierry BOSCH (ENSEEIH Toulouse)

Gérald BRUN (LTSI St-Etienne)

Pierre JACQUOT (EPFL Lausanne)

Pascal PICART (LAUM Le Mans)

Jean-Pierre PRENEL (CREST Belfort)

Pascal ROYER (LNIO UT Troyes)

Paul SMIGIELSKI (club CEMOI)

Yves SURREL (CNAM / INM Paris)

Marc TURPIN (Cédia innovations)

Autres experts contactés en dehors des groupes précédents

François AMIRANOFF (LULI)

Jacques DUPONT-ROC (Département SPM CNRS)

Ariel LEVENSON (Département STIC CNRS)

Gilles LESAUX (ESSILOR)

François REYNAUD (IRCOM)

FONCTIONNEMENT DU GROUPE D'EXPERTS

Afin de répondre au mieux aux quatre parties du rapport souhaitées dans la lettre de la direction de la technologie, la SFO a créé des groupes de travail sur les domaines d'activités suivants :

- Technologie de l'information et télécommunications.(cf. chap.3)
- Santé et sciences de la vie .(cf chap.4)
- Eclairage, visualisation, énergie.(cf chap.5).
- Défense et sécurité.(cf chap.6).
- Procédés de fabrication.(cf chap.7).
- Composants et systèmes.(cf chap.8).
- Capteurs, métrologie, instrumentation, mesure.(cf chap.9).

Pour tenir compte des réalités, les titres ont parfois évolué (chap. 5 et 9).

Dans chaque groupe de travail ont été établis pour le domaine correspondant :

- un bilan de la recherche académique incluant le point de l'existant et les orientations pour l'avenir,
- un bilan équivalent dans le domaine industriel, de la recherche industrielle et du transfert de technologie,
- un état des formations actuelles, des emplois et des besoins de l'industrie pour l'avenir.

La collecte des informations nécessaires et des propositions a été faite dans un travail collectif autour de ces grands thèmes.

La liste des responsables de groupe d'experts et des experts consultés est donnée page suivante. Ils appartiennent soit au monde industriel, soit au monde de la recherche ou de l'enseignement supérieur, soit au milieu institutionnel.

SOMMAIRE

Tome 1 : Rapport de Synthèse

Chapitre 1 Introduction

Chapitre 2 Potentiel et évolutions récentes de l'optique

- 2.1 L'optique élément de base du développement
- 2.2 Mutations récentes
- 2.3 Les formations en optique
- 2.4 Les industries de l'optique
- 2.5 La recherche publique et industrielle
- 2.6 Le transfert de la recherche vers l'industrie

Chapitre 3 Technologie de l'information et télécommunications

Chapitre 4 Santé et sciences de la vie

Chapitre 5 Visualisation, Holographie, Traitement optique de l'image, Eclairage, Energie

Chapitre 6 Défense et sécurité

Chapitre 7 Procédés de fabrication

Chapitre 8 Composants et systèmes

Chapitre 9 Instrumentation de contrôle et de mesure

Chapitre 10 Synthèse des propositions générales

SOMMAIRE TOME 2

Expertises complémentaires

Thème « Technologie de l'information et télécommunications » (Chapitre 3)

3 Rapport complémentaire

Thème « Eclairage, visualisation, énergie » (chapitre 5)

- 5.1 Afficheurs de petits et moyens formats (*Cécile Joubert et Amaury Le Jemtel*)
- 5.2 Visualisations avioniques (*Frédéric Delauzun*)
- 5.3 L'électroluminescence organique (*Pierre Lebarney*)
- 5.4 L'OLED, en route vers l'industrialisation (*Eric Marcellin-Dibbon*)
- 5.5 Traitement optique de l'image (*Pierre Ambs*)
- 5.6 Synthèse : Holographie, Holographie numérique (*Jean-Louis Tribillon, Pascal Picart, Brigitte Loiseaux*)
- 5.7 Composants photo-voltaiques pour la production d'énergie (*Jean-Claude Muller*)

Thème « Les procédés de fabrication » (chapitre 7)

- 7.1 Production de composants optiques
- 7.2 Les composants optiques plastiques
- 7.3 Les matériaux pour l'instrumentation optique (*Jean-Jacques Contet, Alain-Pierre Lilot, Dominique Laroche*)
- 7.4 Les procédés de production pour les applications non instrumentales (*Hervé Arribart, Dominique Laroche*)
- 7.5 Les couches minces optiques (*Marie-Françoise Ravet, Claude Amra, Jean -Marie Mackowski, Guillaume Ravel*)
- 7.6 L'usinage laser (*Club laser et procédés*)
- 7.7 La stéréolithographie (*Serge Monneret*)
- 5.8 Optique diffractante (*Bernard Kress, Olivier Parriaux*)

Thème « Composants et sous-systèmes » (chapitre 8)

- 8.1 Contribution (*Jean-Michel Maisonneuve*)
- 8.2 Contribution (*Philippe Nerin*)
- 8.3 Contribution (*Jean-Luc Ayral*)
- 8.4 Contribution (*Véronique Dentan*)
- 8.5 Le témoignage d'un start-up (*Henri Porte*)

Thème “Contrôle, Mesures et instrumentation » (chapitre 9)

9.1 Contrôle et mesures par techniques interférométriques et holographiques (*Gérald Brun, Paul Smigielski*)

9.2 Interférométrie speckle dans le visible (*Pierre Jacquot*)

9.3 Vision de deuxième génération (*Yves Surrel*)

9.4 Capteurs à fibres optiques (*Marc Turpin*)

9.5 Métrologie optique dédiée aux écoulements (*Jean-Pierre Prenel, Paul Smigielski*)

9.6 Télémétrie laser (*Thierry Bosch*)

9.7 Microscopie optique en champ proche (*Pascal Royer*)

LEXIQUE

ABL : Air Borne Laser
ADEME : Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie
AFPA : Agence pour la Formation Professionnelle des Adultes
ANRT : Association Nationale Recherche Technique
BITD : Base Industrielle et Technologique de Défense
CADAS : Comité des Applications De l'Académie des Sciences
CCMO : Contre-Contre Mesure Optronique
CEA : Centre d'Etudes Atomiques
CIFRE : Convention Industrielle de Formation à la REcherche
CMO : Contre-Mesure Optronique
CNOP : Comité National d'Optique et Photonique
CNRS : Centre National de la Recherche Scientifique
COIL : Chemical Oxygen Iodine Laser
CQP : Certificat de Qualification Professionnelle
CRT ; Cathodic Ray Tube
DEL : Diodes Electro-Luminescentes
DGA : Direction Générale de l'Armement
DMD : Digital Mirror Display
DOE : Diffractive Optical Elements
ESO : European Southern Observatory
FLIR : Forward Looking IR
fs : femtoseconde (10^{-15} seconde)
HF : Fluorure d'hydrogène
IR : Infra-Rouge
KTP : potassium titanyl phosphate
LCD : Liquid Crystal based Display
LIDAR : Light Detection and Ranging
LIR : Lointain Infra-Rouge
LMJ : Laser Méga-Joule
MCT : Mercury-Cadmium-Telluride (HgCdTe)
MIR : Moyen Infra-Rouge
MJ : Méga-Joule (10^6 Joules)
MEMS : Système Micro-Electro-Mécaniques
MOEMS : systèmes micro-opto-eleetro-mécaniques
MOPA : Master-Oscillator Power Amplifier
MTHel : Mobile Tactical High Energy Laser
OCM : Optical Coherence Microscopy
OCT : Optical Coherence Tomography
OEM : Original Equipment Manufacturers
OLED : Organic Light Emitting Diode
ONERA : Office national d'Etudes et de Recherches Aéronautiques
OSF : Optronique Secteur Frontal (sur Rafale)
PIR : Proche Infra-Rouge
PMD : Polarization, Modulation, Dispersion
POD : Nacelle
PPLN : Periodically Polled Lithium Niobate

QCL : Quantum Cascade Laser
QWIP : Quantum Wells Infrared Photodiode
RMNT : Réseau National Micro Nano Technologie
RNRT : Réseau National de Recherche en Télécommunication
SBL : Space Based Laser
SDU : Sciences De l'Univers
SPM : Sciences Physiques et Mathématiques
SSHCL : Solid State Heat Capacity Laser
STIC : Sciences et Techniques de l'Information et de la Communication
THEL : Tactical High Energy Laser
TPE : Très Petite Entreprise
UV : Ultra-Violet
VECSEL : Vertical Cavity Surface Emitting Laser
VLT : Very Large Telescope
WDM : Wavelength Dispersion Modulation

Chapitre 1

INTRODUCTION

Ce rapport « **Bilan des forces et faiblesses de l'optique en France** » traite de l'optique dans le sens le plus général qui est couvert aujourd'hui sous le terme **photonique**, science qui recouvre tout ce qui met en jeu des photons. Il a été rédigé dans le cadre de la Société Française d'Optique (SFO) suite à un appel d'offres de la Direction de la Technologie du Ministère de la Recherche, dont l'objet est une consultation destinée à établir le bilan des forces et faiblesses de l'optique en France.

L'optique connaît depuis plusieurs années un essor mondial incontestable. Après avoir été considérée comme une discipline classique et longtemps limitée au spectre visible et aux applications traditionnelles des images, l'optique couvre actuellement un domaine très vaste. Science de l'ingénierie de l'émission, de la transmission, de la manipulation et de la détection de la lumière, elle est fortement liée aux autres domaines tels que la mécanique, l'électronique et l'informatique. Le composant optique est très souvent une partie essentielle d'un système mais il ne peut être exploité que s'il est utilisé conjointement avec des éléments mécaniques et électroniques et souvent informatiques. La précision d'un système optique formant des images est sûrement due aux performances intrinsèques des composants qui le constituent mais aussi à la qualité et à la précision des montages mécaniques et aux systèmes d'exploitation électroniques et informatiques de traitement des images et du signal. De même en télécommunications optiques, si la fibre reste le moyen de transport de l'information privilégié vu ses capacités opérationnelles, les éléments d'entrée/sortie sont électroniques. Le tout optique n'est pas une réalité même si de nouveaux composants ont fait leurs apparitions par exemple en amplification optique.

Elle est par essence diffusante et touche ainsi tous les domaines de l'activité humaine. Elle est souvent une partie essentielle de nombreux systèmes industriels de contrôle et d'instruments de mesure. Elle participe à la réalisation de pièces en mécanique et elle est présente en lithographie dans les procédés de fabrication de la microélectronique. Le domaine spectral couvert par l'optique est très étendu, couvrant des rayonnements X aux ondes millimétriques ce qui lui permet d'intervenir dans de nombreux domaines. On la trouve dans des secteurs comme la médecine et la biologie. C'est aussi une science hétérogène avec de multiples techniques de fabrication, de nombreux composants. Ceci pose des problèmes d'assemblage et de conditionnement ou d'intégration (packaging).

L'optique est un **champ de recherche** en pleine expansion. La France dispose dans ce domaine d'un ensemble très cohérent de laboratoires de recherche soit dans les grands organismes (CNRS, CEA...) soit dans les universités ou les écoles d'ingénieurs ainsi que dans un certain nombre de grands groupes industriels. Ces recherches touchent à peu près tous les domaines de l'optique du fondamental à l'application. Elles concernent aussi bien les aspects quantiques de la lumière, les matériaux, la propagation, l'optoélectronique, l'étude de nouvelles sources lumineuses et de sources cohérentes plus puissantes. Les résultats sont importants et la recherche française se place au niveau des meilleures que se soit dans l'optique traditionnelle ou couvrant de nouveaux secteurs. Les outils ont évolués et on voit apparaître de nouvelles technologies et une nouvelle physique par exemple avec les lasers de puissance petawatt, le projet SOLEIL, le laser Megajoule fournissant de très hautes températures.... Après l'effort développé autour des micro technologies, la nano optique et la biophotonique deviennent des champs de recherche en développement avec des applications dans divers domaines industriels ou médicaux.

L'optique est aussi un **secteur industriel** de premier plan. L'optique étant, comme on l'a signalé, une technologie diffusante elle se trouve présente dans l'ensemble des domaines de la mécanique au domaine médical. Les champs couverts sont, entre autres, la lunetterie, l'éclairage, la visualisation et l'imagerie, les télécommunications, l'instrumentation, les applications militaires, le multimédia, le spatial et enfin le domaine médical et la biologie. A coté de nombreuses petites et moyennes entreprises on compte en France de grandes firmes dans le domaine telles que ESSILOR (lunetterie), THALES et SAGEM (optronique), ALCATEL et France télécom (télécommunications), EADS, ASTRIUM, ALCATEL SPACE (avionique et optique spatiale), Saint Gobain et Valeo (bâtiment et transport).... Compte tenu des coûts d'investissement, il est nécessaire de fédérer et de créer des pôles ou des centres technologiques pour aider les entreprises.

La crise mondiale actuelle qui a touché en premier lieu le secteur des télécommunications a affecté dans une moindre proportion les autres secteurs et le secteur des applications a conservé son essor et son dynamisme. A titre d'exemple en 2002 la vente mondiale totale de laser a chuté de 24 % pour atteindre 4.3 billions de dollars. De la même manière la chute des lasers médicaux a été de 24%. Par contre le marché de l'enregistrement optique (DVD, DVD rom, CD... a cru de 80% jusqu'à 1.4 billions de dollars (476 millions de diodes laser). La croissance mondiale dans la photonique est fortement positive. Une étude publiée par « Photonics Industry & Technology Development Association »montre une croissance entre 1999 et 2003 pour le marché mondial de la photonique de 142 à 248 milliards de dollars US. Ceci étant du aux applications de l'optique dans les domaines de la défense, du médical, de la robotique et des micro et nano technologies, les multimédias (stockage de l'information, la visualisation ...), les lasers. Le nombre de brevets déposés chaque année aux USA est de 53000 . Les dix premières entreprises en nombre de dépôts sont américaines, japonaise, allemandes, hollandaises. (Opto Laser Europe Mars 2003)

Dans le secteur des télécommunications on a assisté en France à la fermeture ou à la réduction drastique de l'effectif d'un nombre important de PME (Highwave, Nettest...) et dans certaines grandes entreprises qui réduisent leur département optique. La position forte de la France dans ces secteurs a été en grande partie due aux recherches développées au CNET qui ne les développe plus. Cette crise a aussi modifié la structure de certaines de ces entreprises qui se séparent de la fabrication des composants. On se trouve ainsi confronté à un nouveau problème avec de grandes entreprises proposant des équipements complexes,

mais qui n'auront plus la maîtrise des technologies critiques ni la maîtrise de la fabrication des composants. Parallèlement, de nouvelles jeunes pousses (start-up) voient le jour dans de nouveaux secteurs et on note une évolution positive des créations d'entreprises.

Une remarque faite dans le rapport JERPHAGNON en 1987 soulignait pour la France le décalage entre une recherche universitaire ou industrielle de haut niveau et un développement industriel plus restreint, limité à quelques grandes entreprises et ne couvrant qu'une partie du domaine. Ceci reste encore vrai à l'heure actuelle. L'instrumentation et les machines de production associées aux lasers, dont le développement industriel ne s'est pas produit malgré des recherches importantes, en sont des exemples. Il est encore vrai que dans le jugement de la qualité du travail du chercheur par les commissions du CNRS en vue de son de avancement la recherche appliquée et industrielle n'est pas prise en compte. Ceci n'incite pas ou peu les chercheurs à s'investir dans ces travaux. Mais des progrès sensibles ont été faits, suite à ce rapport, dans une meilleure collaboration recherche / industrie.

L'enseignement de l'optique représente une partie importante en ce qui concerne le niveau enseignement supérieur qui fournit cadres et techniciens. L'exploitation des récents rapports du GIFO (l'Enseignement de l'Optique, 2001) et d'OpticsValley (Etude de l'adéquation emploi/formation secteur optique, 2002) montre le foisonnement de formations disponibles à ce niveau (Brevet de Technicien Supérieur, Diplôme Universitaires de Technologies, titres d'ingénieurs, Diplômes d'Etude Approfondie et Diplôme d'Etudes Supérieures Spécialisées), mais fait apparaître un manque certain dans le cas des certificats d'Aptitude Professionnelle (CAP), des Brevets d'Etudes Professionnelles (BEP), des Brevets de Technicien (BT), des Baccalauréats technologiques STI dont l'industrie a besoin. En particulier deux besoins distincts se font jour - d'une part des étudiants formés au polissage pour produire des composants optiques car la France perd ses capacités en ce domaine mais il s'agit d'un faible effectif - d'autre part des étudiants formés pour le montage optique avec des connaissances en optique, en mécanique et en électricité avec un effectif plus important. Ce dernier peut être proche du montage de mécanique de précision mais avec une spécificité sur les matériels et sur les techniques de réglage. D'autres améliorations à la sensibilisation des opérateurs aux apports de l'optique peuvent être suggérées, en particulier en incitant à l'introduction d'un enseignement sur l'optique dans certains cursus spécialisés par exemple en mécanique.

Un point important à considérer est l'équilibre nécessaire entre les trois composantes industrie-recherche et formation tel qu'il est traduit dans le schéma suivant (voir Figure 1.1). C'est un des problèmes que se posent beaucoup d'enseignants et d'étudiants à l'heure actuelle. Si l'un de ces secteurs est défaillant les deux autres sont en péril. En particulier si une partie de l'industrie de l'optique n'est plus capable d'embaucher des opticiens, une partie des enseignements se trouvera sans débouchés et la recherche avec moins de moyens.

La communauté des opticiens français se retrouve :

- dans des associations scientifiques : le Club Nanotechnologie, la Société Française d'Optique (SFO) qui est la plus importante avec ses propres clubs (CEMOI, Club Visualisation) et sa liaison avec les autres communautés européennes, le Club Laser et procédés
- dans un syndicat professionnel (GIFO)

Depuis quelques années des associations régionales constituant des pôles régionaux dont certains sont dotés en personnel et en moyens lourds soutenus par les Régions, l'Etat, les collectivités locales, les industriels et parfois l'Europe: Pôle Optique et Vision (Saint-Etienne), OpticsValley (Palaiseau), POPsud (Marseille), Anticipa (Lannion), 2ADI (Agence Aquitaine Développement Industriel) (Bordeaux), Rhéna-photonique (Strasbourg) ou de club : Alpes Optique et Photonique (Grenoble), sont apparues. Le rôle de ces entités régionales est de participer au développement du transfert de technologie et au développement économique des régions. Ils sont soutenus financièrement par les Régions et sont donc quelque peu en compétition.

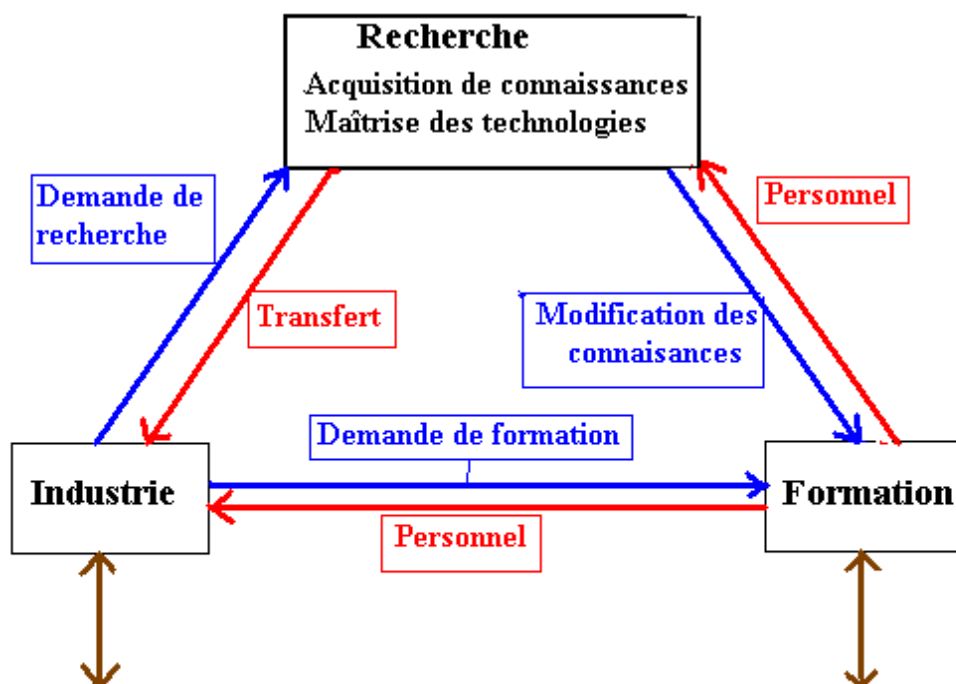


Schéma des équilibres recherche-industrie-formation-transfert

Figure 1.1

Enfin le Comité National d'Optique et de Photonique (CNOP), créé en 2003, est l'émanation de ses membres fondateurs qui sont le GIFO, la SFO, les Pôles régionaux. Il œuvre pour être reconnu comme interlocuteur de toute l'optique française sur le plan national et au niveau européen.

Depuis quelques années les liens se tissent parfois étroitement au **niveau européen** tant dans le domaine industriel par des entreprises établies sur plusieurs pays que dans les domaines de la formation et de la recherche par des projets communs. Ce caractère européen ne peut que s'amplifier à l'avenir.

Le but de ce rapport est d'établir le bilan à l'heure actuelle du développement de l'optique en France dans les domaines de l'industrie, de la recherche, de l'enseignement et du transfert de technologie et de faire des propositions précises. Il se révèle tout particulièrement important compte tenu des évolutions actuelles.

Il permettra aussi de voir comment, depuis des rapports effectués il y a quelques années (rapport JERPHAGNON 1987, rapport du CADAS 1993), l'optique s'est développée en France et de mesurer si les propositions de l'époque ont été suivies et quelles en ont été les conséquences.

Dans un prochain chapitre seront abordés : les mutations récentes et les grandes lignes du potentiel actuel français sur les plans industriel, de la recherche, de la formation et du transfert de technologie.

Les chapitres suivants (Chapitre 3-chapitre 9) feront le point sur les évolutions suivant les thématiques retenues. Dans chaque chapitre un certain nombre de propositions et des recommandations (écrites souvent en italique) seront faites en vue d'améliorer le potentiel actuel.

Le chapitre 10 résume quelques propositions et recommandations plus générales.

Dans un deuxième fascicule, en annexe, les rapports détaillés fournis par certains experts sont présentés et constituent une source d'informations complémentaire .

Chapitre 2

POTENTIEL ET EVOLUTIONS RECENTES

2.1 L'optique élément de base du développement

L'optique est certainement la discipline la plus exploitée par l'homme car elle correspond à un de ses senseurs naturels les plus performants : la vision. Si on interrogeait l'homme de la rue en lui demandant de définir l'optique il n'y a pas si longtemps, la plupart des personnes l'identifiaient à la **lunetterie** et à la **photographie**. Car c'est dans ces deux domaines que le contact avec le public est le plus courant et ils représentent des marchés mondiaux importants et à évolution technologique continue.

La vocation première de l'optique a été la **formation des images**. Depuis un siècle les systèmes et appareils n'ont cessé de faire des progrès. L'image n'est plus seulement une représentation plane d'objets visibles mais aussi d'objets éclairés dans d'autres domaines de longueur d'onde et parfois avec reconstitution du relief. Elle permet à l'homme de voir à des distances immenses de plusieurs milliers d'années lumière. Les grands instruments permettent de balayer des zones de l'espace très éloignées (par exemple avec les grands télescopes optiques). Mais elle permet aussi de scruter des distances nanométriques et avec les nouveaux microscopes d'approcher les dimensions des atomes. Les progrès sont considérables dans la réalisation des zooms. Les champs couverts par les systèmes imageurs s'étendent dans des domaines de longueurs d'onde très étendus depuis les rayons X jusqu'à l'infra rouge millimétrique. On trouve des hologrammes dans bien des applications.

Actuellement l'optique intervient dans tous les domaines de la société.

Elle a fait son entrée dans le grand public comme véhicule d'information essentiellement du fait de l'enregistrement et de la lecture optique de disques optiques et de la visualisation. Son introduction dans le domaine des télécommunications a participé à l'essor rapide et phénoménal des échanges. Toutes les recherches et les développements industriels autour des fibres optiques et des composants électroniques associés ont amené aux performances actuelles avec des débits d'informations inespérés. La mise en place de systèmes à haut débit est à l'étude en de nombreux endroits. Le couplage optique-électronique-informatique y est exemplaire. L'arrivée sur le marché en un temps record de composants tout optiques comme les amplificateurs à fibres dopées erbium ou le multiplexage optique sont des conséquences des efforts de recherche entrepris.

Les **lasers** sont devenus des instruments industriels couramment utilisés dans la mesure et l'alignement (télémétrie par exemple). Ils sont devenus des outils dans les industries de la mécanique pour souder, assembler, percer, surfacer, découper. Ils servent au prototypage c'est à dire à créer des objets en photo polymérisant un monomère (stéréolithographie) ou en fondant une poudre (frittage). Ils ont des applications dans le domaine médical (ophtalmie). Ils sont **l'instrument de recherche** dans bien des domaines scientifiques tirant profit des lasers de plus en plus puissants et / ou délivrant des durées d'impulsions de plus en plus courtes. Ils ont aussi trouvé un emploi dans des applications de loisirs ou de décoration pour illuminer des monuments. La lecture des codes barres utilisée dans tous les grands magasins montrent la pénétration de l'optique dans la vie courante.

L'optique est aussi très présente dans le domaine spatial. Elle est embarquée dans les satellites pour l'analyse des ressources terrestres et la météorologie. L'optique a su réaliser son couplage avec l'électronique, la mécanique et l'informatique pour conduire aux instruments de haute technologie d'aujourd'hui que l'on retrouve dans le domaine spatial, dans les grands instruments en astronomie avec des miroirs de plus de 10 mètres de diamètre, dans l'instrumentation industrielle ou médicale. Elle est souvent à la base de système de **mesure et de contrôle** où elle représente l'élément actif : interféromètres, capteurs de position, lidars. Dans les systèmes robotisés ou dans les chaînes de fabrication, des systèmes optiques de vision permettent des contrôles en continu et sans contact. Dans le domaine de la défense, le couplage de l'optique avec des systèmes d'armes ou d'observation a donné naissance à l'**optronique**.

Elle intervient de plus en plus dans **les procédés de fabrication** en fournissant les processus nécessaires (couches minces, procédés lasers, lithographie).

Depuis quelques années l'optique a fait son entrée dans les sciences **biologiques et médicales** en développant, en dehors du microscope, de nouveaux moyens de détections et d'analyse. On peut citer la tomographie en optique cohérente (Optical Coherence Tomography ou OCT) basée sur l'interférométrie. Autre exemple, l'optique intervient dans la conception elle même des **biopuces**. En particulier les progrès faits en imagerie ont permis la mise au point de systèmes performants. Des applications se trouvent dans le domaine du handicap.

Un autre secteur significatif des progrès de l'optique dans notre vie sociale est celui de la sécurité où l'authentification de documents se fait grâce à des hologrammes.

L'optique est donc présente dans presque tous les domaines de notre société comme l'électronique ou l'informatique. Dans notre civilisation à peu près chaque individu a ou aura besoin des services de l'optique (lunetterie, multimédias, transports, médecine...). Les marchés correspondant sont très importants et touchent toute la population. Tous ces exemples montrent combien l'optique est un **élément de base de notre développement**.

L'intérêt des technologies optiques pour la croissance économique a été reconnu par l'Europe dans le cadre du 6^{ème} programme pour la recherche et le développement (6ème PCRD) avec un montant de 17.5 billions €. Les thèmes retenus sont les méthodes modernes de

production, le diagnostic et le traitement des tumeurs par le rayonnement lumineux, les nouvelles méthodes de lithographie optique.

La France a une vieille tradition en optique. Elle a encore une excellente place dans la compétition internationale, même si elle a en partie perdu les marchés dans certains secteurs d'application. L'optique est un des **secteurs forts de la recherche** actuelle dans les universités et les organismes comme le CNRS ou le CEA ou dans l'industrie. Les recherches actuelles sur des structures de plus en plus petites (micro optique et nano optique) vont conduire à une miniaturisation des systèmes, à une augmentation de leur capacité et de leur fonctionnalité. Il existe de plus un **fort potentiel d'enseignement** qui permet de former les cadres opticiens de demain (techniciens, ingénieurs, chercheurs et enseignants). C'est sur ces potentiels de recherche et de formations que reposent les développements futurs de l'industrie. Celle-ci ne pourra renforcer sa position que si elle s'appuie sur une recherche forte et un enseignement adapté et de haut niveau et des moyens de transfert recherche/industrie.

Face à un marché mondial en expansion (voir figure 2.1), la France représente 30% du potentiel Européen au même niveau que nos voisins Allemands et Anglais, l'Europe représentant 30 % du marché potentiel mondial. Sauf dans le domaine de la lunetterie, elle n'a pas su ou pu développer de marchés grand public sur bien des domaines alors qu'elle dispose des moyens de recherche et les formations. C'est un point que l'on va analyser. L'un des freins est certainement le coût encore élevé des produits.

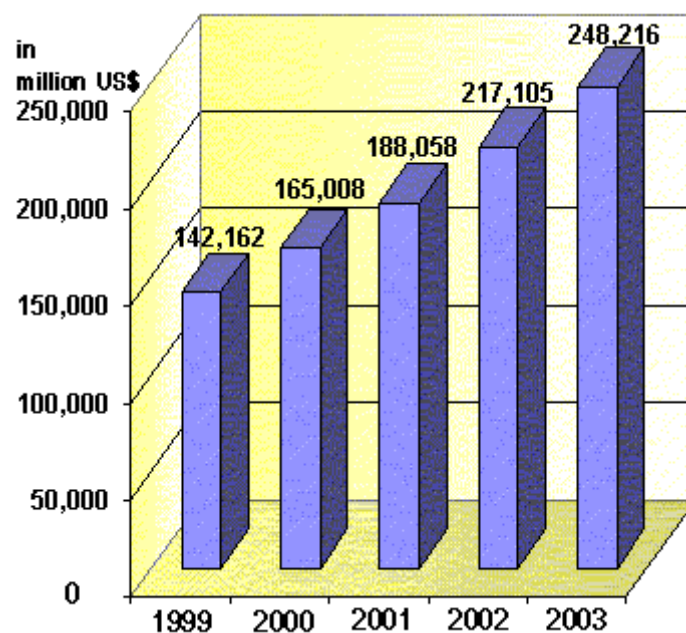


Figure 2.1

*Extrait de Photonics Industry & Technology Development Association
http://www.globalsources.com/MAGAZINE/EC/EC POLL/PIDA_01.HTM*

2.2 Mutations récentes

Vers l'étude et la réalisation d'objets de plus en plus petits.

Depuis quelques décennies la plupart des objets utilisés en grand public tendent à prendre des dimensions réduites et l'optique n'échappe pas à cette loi. L'arrivée des **micro systèmes** qui a débuté tout d'abord au Japon et au USA il y a quelques années a eu pour objectif la miniaturisation des éléments nécessaires à un système. La recherche de composants de dimensions de plus en plus réduites pour des applications en télécommunication, en instrumentation ou en médecine a conduit à l'étude de **systèmes micro-opto-electro-mécaniques** (MOEMS) qui résultent de l'association de l'optique, de l'électronique et de la mécanique. La réalisation de tels composants est basée sur l'utilisation de techniques dérivées de la microélectronique pour la fabrication de masse c'est à dire en milliers voir millions d'exemplaires ou sur des marchés plus faibles. Si les composants optoélectroniques classiques restent en général plus rapides, les MOEMS offrent des fonctionnalités nouvelles. Des retombées sur la microélectronique se font par le biais de la photolithographie en 2D et par la microstéréolithographie pour le 3D.

De même des avancées très importantes se sont faites vers les **nanotechnologies** et la **nano optique**. Les études portent sur des objets ou structures de taille nanométrique. Les exemples sont nombreux et les résultats importants. Les microscopes à effet tunnel où la sonde est une fibre optique effilée permettent d'avoir une « image » de la surface d'un matériau à quelques nanomètres. Cette poussée vers des dimensions spatiales très petites se retrouve dans le domaine temporel. Les impulsions des lasers peuvent être de l'ordre de la femtoseconde et tendent encore à diminuer. De plus les **recherches fondamentales** entreprises au niveau quantique ont permis des avancées assez considérables dans le domaine des boîtes quantiques (permettant la réalisation des diodes bleues), des horloges atomiques et de la mesure du temps, de l'optique atomique.

Vers de nouvelles sources de lumière et leurs applications.

Les recherche sur les lasers ont permis la réalisation des **lasers de grande puissance** qui a leur tour modifie les possibilités et les champs de recherche. La réalisation des puissances de l'ordre du peta Watt ou plus, permettra des études de structure de la matière plus poussées. Une des conséquences des recherches sur la puissance des lasers est la mise en place du laser Mega Joule au CESTA près de Bordeaux. De même les diodes lasers ont fait des progrès considérables avec de fortes puissances sous un faible volume ouvrant l'espoir de pomper les grands lasers et de réaliser de l'usinage. Parallèlement on assiste à un raccourcissement des impulsions lasers. Enfin des nouvelles sources de photons sont apparues. La maîtrise de l'électro luminescence de matériaux organiques a permis la création de nouvelles sources (OLED) avec des applications en visualisation. Enfin de nouvelles sources brillantes ont des applications dans l'automobile. En particulier on note la percée des Diodes Electroluminescentes (DEL) en 2002 est importante avec 2 billions de dollars de marché et une croissance de 50%.

Vers un couplage de plus en plus fort entre disciplines.

Un des faits marquants actuels est le **couplage** entre disciplines physique, chimie, biologie qui s'est accentué au cours de ces dernières années. Il en découle d'une part une utilisation de l'optique dans les sciences du vivant de manière plus importante qu'auparavant. Ceci touche le domaine du contrôle, de la mesure et de l'analyse. La naissance de la **bio photonique** va amener des développements importants tant en recherche que dans le domaine industriel. On peut d'autre part apercevoir les grands progrès faits dans la réalisation des instruments de haute technicité. De même dans la prise des images, leur détection et leur traitement, le couplage **optique-mécanique-électronique** a permis de réaliser les zooms actuels et le couplage **détecteur optique-mécanique- électronique –informatique** permet d'obtenir et traiter ces images. L'optronique a pu bénéficier de tous ces apports. De même en biophotonique un couplage est nécessaire entre **optique-chimie- biologie**.

Le travail en collaboration avec les équipes de chimie dans le domaine des matériaux plastiques a de nombreuses conséquences pratiques sur les sources et les composants. Il pourrait en être de même dans le domaine des sols-gels. Ces collaborations, fructueuses, entre disciplines sont parfois difficiles à mettre en place du fait des problèmes de langage et de méthodes de travail mais elles doivent être multipliées.

Vers de nouveaux matériaux et de nouveaux procédés de fabrication.

Le domaine des matériaux pour l'optique a beaucoup évolué avec l'apparition de nouvelles méthodes de production et la nécessité de rendre les composants, les systèmes et les appareils de plus en plus légers et de plus en plus performants. Parallèlement le besoin c'est fait sentir d'avoir des composants avec des fonctionnalités nouvelles. Ainsi sont nés d'une part un ensemble de nouveaux procédés et d'autre part de nouveaux matériaux. Les méthodes sol-gels permettent de réaliser des matériaux de manière plus simple. Les lentilles asphériques sont maintenant en production avec des usinages par des machines magnéto-rhéologiques et on cherche à réaliser des verres à gradients d'indice. Aux verres minéraux classiques utilisés pour les lunettes se sont ajoutés les verres organiques. Les exemples de matériaux nouveaux utilisés en optique sont nombreux : couches minces cristallines, cristaux photoniques, céramiques, polymères qui conduisent à de nouvelles applications dans la réalisation de composants...

Vers une croissance de la recherche et une augmentation des cursus de formation.

Le développement de l'optique ces dernières années a généré une croissance des unités de recherche qui ont intégré des thèmes dont l'optique est soit la finalité ou plus simplement le support. Ceci est vrai dans des unités de physiciens ou astrophysiciens qui traditionnellement ont une activité dans l'optique mais aussi en chimie, biologie, médecine. Parallèlement beaucoup de cycles d'enseignement en électronique ont progressivement ressenti la besoin d'introduire puis de développer des cursus de formation en optique soit par le biais des télécommunications soit par celui de l'instrumentation. Cette croissance en recherche et en enseignement est une chance pour l'avenir si on sait renforcer les liens avec l'industrie et le moyens de tous ordres pour faciliter les transferts de technologies.

Mutation industrielle

Les grandes entreprises ont modifié leur stratégie et suivent la tendance générale en se focalisant sur la réalisation de systèmes et sur la conception d'architectures. L'objectif est de se concentrer sur les produits à forte valeur ajoutée, tout en veillant à garder une indépendance sur les composants et produits stratégiques. Ceci est en particulier vrai dans les télécommunications optiques où Alcatel et Corning, tout comme Nortel, Ericsson et Lucent, se séparent de leurs unités de fabrication de composants tout en gardant le potentiel de leurs centres de recherche et parfois une partie du capital de la société, même si cette tendance semble ne pas avoir été suivie du côté des constructeurs traditionnels asiatiques (NEC, Fujitsu, ..). Les composants optiques et opto-électroniques sont réalisés par de grands composantsiers (Bookham, Avanex, Infineon en Europe) pour rentabiliser les investissements lourds. Cette recherche de la rentabilité et de la pérennité sera également poursuivie, comme dans l'industrie de l'électronique, en veillant à développer des composants pour de multiples applications, à la fois dans les domaines des télécommunications, du militaire, du spatial/aéronautique, de l'automobile, etc.... En parallèle, il faut noter la création et l'existence d'une multitude de spin-off et start-up, d'ambition et de taille variables.

On peut se poser la question de savoir ce que sera l'industrie de l'optique en France dans le futur, et comment éviter d'avoir des difficultés à s'approvisionner en composants. On évolue vers une grande industrie de conception, de fabrication et de gestion de réseaux pour les services, mais avec la maîtrise des éléments critiques à travers un couplage «concepteur-fabriquante-évaluateur» pour maintenir le niveau requis d'innovation. Il est donc nécessaire de prévoir des structures pour mettre au point et réaliser ces composants stratégiques avec une mutualisation des moyens de production et des regroupements. C'est d'ailleurs l'un des objectifs des laboratoires communs public/privé et autre GIE que de contribuer efficacement à ce transfert entre le monde académique et le monde industriel. Il faudra veiller également à proposer un ticket d'entrée abordable par les PME.

Européanisation et internationalisation de l'optique

Les coopérations et échanges européens existaient depuis longtemps dans les domaines de la recherche, et depuis quelques années ils se sont renforcés dans tous les secteurs de la formation, et de l'industrie. Les grandes entreprises ont des usines dans plusieurs pays européens ou même hors Europe. Ces coopérations devraient permettre un dynamisme plus grand dans les grands projets et une mutualisation des moyens lourds.

2.3 Les formations en optique.

La formation en optique est très présente dans l'enseignement supérieur (Université et Ecoles d'ingénieurs) où l'étudiant peut faire un choix sur un large éventail depuis le niveau baccalauréat plus deux jusqu'au doctorat. Par contre elle est très peu présente dans l'enseignement secondaire (sauf le Baccalauréat technologique STI option Génie optique qui n'existe que dans 6 lycées pour tout le territoire national).

Au niveau des filières courtes (baccalauréat plus deux) une formation optique qui conduit au **Brevet de Technicien Supérieur (BTS)** est dispensée dans certains lycées. Ce sont des diplômes nationaux qui forment des techniciens supérieurs pour assurer des tâches d'encadrement. Le **BTS Génie optique** comporte deux options : l'option photonique (GOOP) et l'option optique instrumental (GOOI). On compte 8 établissements essentiellement des lycées qui préparent au BTS GOOP et 4 qui préparent au BTS GOOI. Le **BTS opticien-lunetier** est le plus répandu et préparé dans 19 établissements répartis sur le territoire national

Le **Diplôme Universitaire d'Opticien Lunetier (DUOL)** est une autre filière courte qui se prépare dans deux universités (Marseille et Saint-Etienne)

Les **Diplômes Universitaires de Technologie (DUT)** sont aussi des filières courtes. Ils sont délivrés par les Instituts Universitaires de Technologie (IUT) et se préparent en deux ans. Il n'existe pas de DUT spécialisés en optique mais les DUT de Mesures physiques comportent une bonne base en optique. On compte 25 IUT qui préparent ce DUT répartis sur tout le territoire. C'est dans ces filières que l'industrie de l'optique et les laboratoires de recherche recrutent une partie de leur personnel technique.

Dans les cursus universitaires l'optique est enseignée dans les trois cycles de formations scientifiques de nombreuses universités. Dans les premiers cycles, DEUGS Sciences de la Matière et Sciences et Technologies pour l'Ingénieur, les éléments de bases figurent aux programmes, dans les seconds cycles de physique, Licence et Maîtrise de physique, Licence et Maîtrise EEA option Electronique microélectronique et optronique, Licence et Maîtrise de Physique et Applications, les enseignements intègrent les notions de physique fondamentale et de photonique et les technologies classiques. On trouve les maîtrises de physique dans la plupart des universités scientifiques et les **licences professionnelles** avec une vocation optique dans certaines universités (5 actuellement).

Les formations de troisième cycle **DESS** (Diplômes d'Etude Supérieur Spécialisé) et **DEA** (Diplôme d'Etude Approfondie), dont le thème principal est l'optique ou la photonique couvrent un grand nombre d'universités réparties sur tout le territoire. Dans les troisièmes cycles une spécialisation plus importante est opérée et tout le domaine de l'optique est couvert. Les étudiants inscrits dans les 12 DESS existants ont une formation qui les oriente vers le monde industriel. Les Diplômes d'Etude Approfondie conduisent à une thèse et un titre de Doctorat. Les étudiants de ce cursus constituent un des maillons importants de la recherche. Plus récemment dans l'espace européen une nouvelle architecture des cycles d'enseignement supérieur dite (3,5,8) ou **LMD** (Licence, **M**astère, Doctorat) est mise en place dès cette année dans plusieurs universités en remplaçant DESS et DEA (Saint-Etienne, Paris ...). Il existe un mastère professionnel et un mastère recherche qui permet l'accès au doctorat. Actuellement on compte en France 43 DEA ou mastères recherche dans lesquels le programme d'enseignement est totalement ou partiellement consacré à l'optique et répartis sur toute la France (voir carte figure 2.2). Les étudiants issus de ces filières alimentent l'enseignement supérieur, la recherche et pour une partie l'industrie

Une seule grande école forme des **ingénieurs opticiens**. L'Ecole Supérieure d'Optique (ESO) est située à Orsay avec une partie d'enseignement délocalisée en province (3ème année en instrumentation optique à Saint-Etienne). Il faut y ajouter l'enseignement

d'optronique NFIO (Nouvelle Formation Ingénieurs en Optronique) à Orsay, l' ESPEO à Orléans, ainsi que le CNAM (Conservatoire National des Arts et Métiers).

Par ailleurs 12 établissements délivrent un diplôme **d'ingénieur** dans lequel une partie importante de l'enseignement est consacrée à l'optique mais est couplée avec des enseignements d'électronique, d'informatique ou de matériaux. Les écoles EGIM (ex ENSPM Marseille), ENSPG Grenoble, ENSPS Strasbourg, ENSSAT Lannion, ISTASE St-Etienne, INT Evry ont des filières identifiées. D'autres écoles consacrent une partie de leur formation à l'optique : ISMRA Caen, ENST Paris, ENSERG Grenoble, ENSCPB Bordeaux, ENI Brest, ESSTIN Nancy. Certaines écoles ont des enseignements en alternance.

Le tableau II.1 résume les nombres et types de formations dans l'enseignement supérieur et le tableau II.2 la liste de ces formations hors BTS opticien-lunetier.

Au niveau des études doctorales il existe un certain nombre de bourses qui facilitent le contact entre les centres d'enseignement, les laboratoires de recherche et l'industrie et contribuent à la formation par la recherche (conventions CIFRE, bourses cofinancées CNRS, Bourses Régionales).

En plus des échanges traditionnels d'étudiants à l'aide de bourses post-doctorales, on assiste à une coopération européenne entre de nombreuses universités en créant soit des diplômes reconnus par les deux parties, soit des échanges d'étudiants au cours du cursus soit des demandes de création de mastère commun en particulier sur les universités frontalières.

La formation dite continue ou permanente est présente dans de nombreux sites universitaires, entreprises et associations spécialisés sur un domaine particulier. Il s'agit de formations dispensées soit de haut niveau, soit de remise à niveau, soit des stages de quelques jours sur des technologies nouvelles ou permettant une reconversion du personnel technique.

Au niveau de l'encadrement des étudiants en particulier de troisième cycle universitaire il est fait appel à des chercheurs du CNRS dans leur spécialité. Trop peu de cadres de l'industrie participe à l'enseignement.

Plusieurs remarques et suggestions peuvent être faites

Il existe une bonne couverture nationale (voir figure 2.2) et un choix satisfaisant de cursus pour l'enseignement de l'optique sur le territoire national dans l'enseignement supérieur. Cependant :

Il est nécessaire de maintenir un niveau suffisant d'enseignement de l'optique dans le cursus secondaire et en particulier dans les filières technologiques, les opérateurs ayant de plus en plus à utiliser des moyens optiques de mesure et contrôle.

Il est important d'introduire l'enseignement de l'optique dans des cursus où elle est absente tels les écoles ou formations de mécanique et de chimie et dans les BTS classiques de vibration acoustiques et d'analyse vibratoire ou de cursus d'électronique. En effet les moyens de contrôle et de mesure dans ces disciplines sont souvent optiques et les techniciens et

ingénieurs sont amenés à utiliser de plus en plus de techniques telles que l'interférométrie, l'holographie....

Les enseignements de la colorimétrie et représentation des couleurs ainsi que de l'optique physiologique sont peu présents et doivent être développés, de même le contrôle industriel et la télédétection.

Un reproche fait au BTS optique pur réside dans le fait que l'industrie actuelle a besoin de techniciens opticiens qui possèdent non seulement de fortes connaissances d'optique mais qui soient généralistes avec des connaissances en électronique et mécanique.

La formation de personnels techniques pour la réalisation de pièces optiques- d'une part la formation des opérateurs de polissage (le nombre d'élève à former est toutefois restreint voir proposition Thème 5) – d'autre part la formation des monteurs (nombre d'étudiants plus important à former) sont à renforcer en créant un cycle court adapté ou en renforçant un cursus existant.

Faire participer davantage de personnels venant de l'industrie sur des problèmes relevant de leur compétence.

Tableau II.1

FORMATIONS COURTES						FORMATIONS LONGUES				
BTS			DUOL	DUT	Licence Profession-nelle	DESS ou Mastère Professionnel	DEA ou Mastère Recherche	Ecoles d’ingénieurs		
Opticien lunetier	GOOP	GOOI						d’Optique	Filière Optique Identifiée	avec enseignement d’optique
	19	8	4	2	25	6	13	43	3	7

Répartition géographique des enseignements d'optique (hors BTS opticien lunetier)

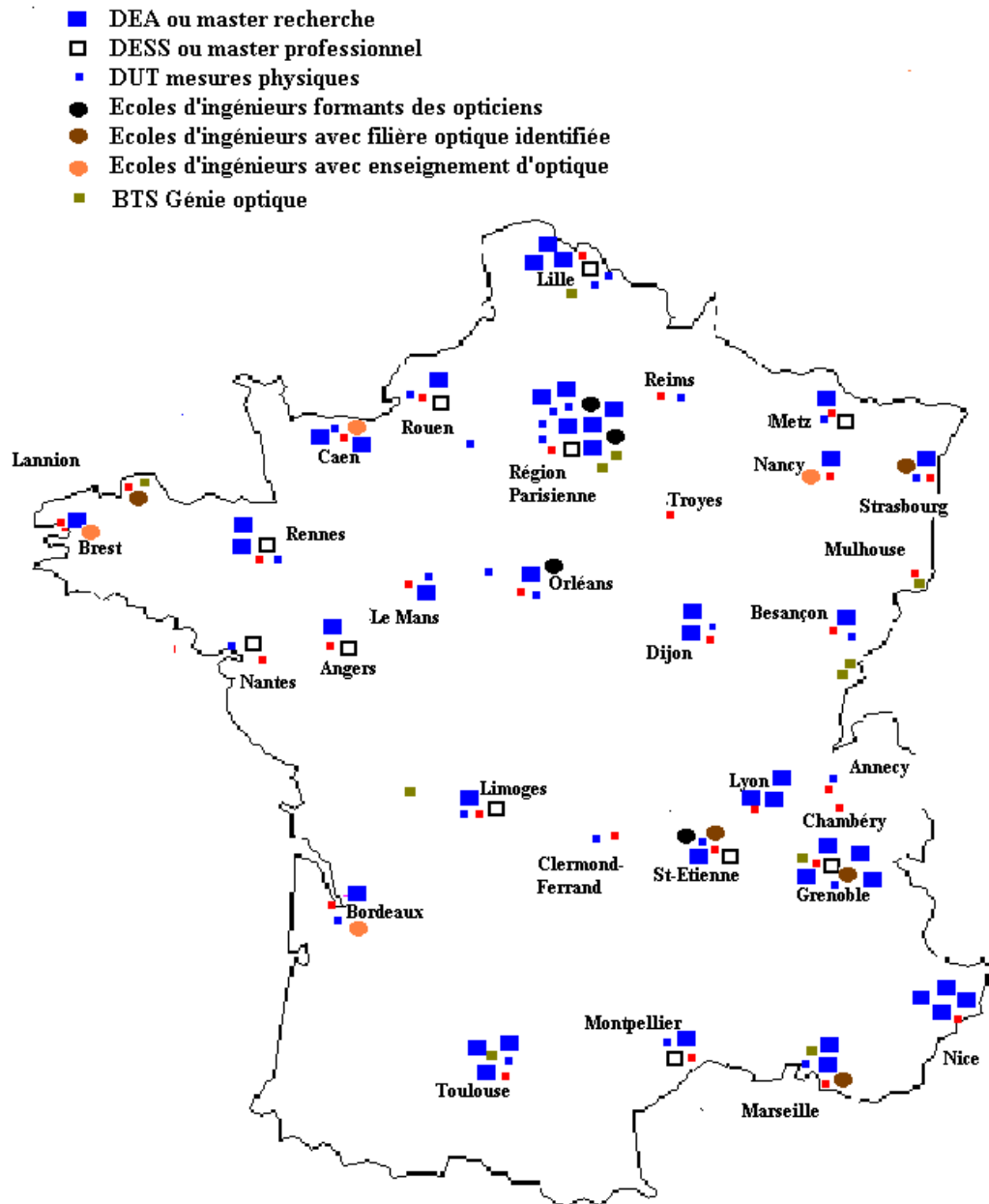


Figure 2.2

Tableau II.2

Liste des établissements délivrant des diplômes en Optique (hors BTS opticien-lunetier)

DEA (Da) et Masters Recherche (MR)

Caen	Da	Electronique Capteurs Image
ISMRA	Da	Physique de la Matière et du rayonnement
Aix Marseille	Da	Optique image et signal
	Da	Rayonnements et plasmas
Toulouse	Da	Rayonnements et imagerie en Médecine
INP	Da	Micro ondes et télécommunications optiques
	Da	Signal, image et acoustique
Nice	Da	Propagation Télécommunication et Télédétection
	Da	Image-Vision
	Da	Signal Images et communications
	Da	Astronomie :haute résolution angulaire, image et gravitation
	Da	Photonique :fondements, matériaux, applications
Grenoble	UJF MR	Matière et rayonnement :matière condensée
	Da	Modèles et instruments en médecine et biologie
	MR	Physique des matériaux : des nano structures aux grands instruments
	MR	Micro et nano électronique
	INPG Da	Optique, Optoélectronique et micro ondes [Chambéry]
Rennes	Da	Matière et rayonnement
	Da	Signal, télécommunications, image, radar
Lille	Da	Micro ondes et micro technologies
	Da	Instrumentation et analyses avancées
	Da	Lasers, molécules, rayonnement atmosphérique
Saint-Etienne	MR	Optique, image, vision :image, vision, signal
	MR	Optique, image, vision :optique, photonique, hyperfréquences
Besançon	Da	Acousto-optoélectronique et mécanique des structures
Lyon	INSA Da	Images et systèmes
	Da	Dispositifs de l'électronique intégrée
	UCB Da	Particules, noyaux, atomes et photons
Paris 6	Da	Physique expérimentale des atomes et des molécules
	Da	Physique quantique
	Da	Astrophysique et instrumentation associée
	Da	Physique et technologie des grands instruments[
Paris 7	Da	Astrophysique et méthodes associées
Paris 11	Da	Optique et photonique [ESO,6,7]
	Da	Laser et Matière
Limoges	Da	Très hautes fréquences et optique[Poitiers]
Le Mans	Da	Capteurs optiques et instrumentation [Angers]
Bordeaux	Da	Lasers et matières denses
Brest	Da	Sciences et technologies des télécommunications [ENI, ENSSAT, ENST]
Dijon	Da	Physique: matière et rayonnement

	Da	Instrumentation et informatique de l'image
Nancy	Da	Plasma optique électronique et micro système [Metz]
Angers	Da	Physique, optique et hétéro structure

DESS (D) et Mastères Professionnelles (MP)

Nantes	D	Conception, mise en œuvre et qualité des composants électroniques et optoélectroniques
Rennes1	D	Systèmes électroniques et optoélectroniques
	D	Méthodes spectroscopique d'analyse et de caractérisation physico-chimiques
Lille	D	Microélectronique et microondes
St-Etienne	MP	Optique, images, vision : contrôle et vision
	MP	Optique, image, vision : Instrumentation optique et hyperfréquence
Montpellier2	D	Optoélectronique et hyperfréquences
Limoges	D	Communications radiofréquences et optiques
Grenoble 1	MP	Optique et photonique
Angers	D	Ingénierie en optoélectronique Signal Imagerie
Metz	D	Méthodes avancées d'analyses physiques, physico-chimiques. Lasers et Applications
Rouen	D	Diagnostic laser et métrologie optique

DUT de mesures physiques : ville universitaire

Université	Localisation
Univ Aix Marseille 3	Aix Marseille
Univ. de Franche Comté Besançon	Montbéliard
Univ de Blois	Blois
Univ. Bordeaux 1	Talence
Univ de Caen	Caen
Univ. de Savoie	Annecy le vieux
CNAM	Paris
Univ Clermont Ferrand 1	Aubière
Univ. de Bourgogne Dijon	Le Creusot
Univ Grenoble 1	St Martin d'Hères
Univ. du Maine	Le Mans
Univ de Lille 1	Villeneuve d'Asq
Univ de Limoges	Limoges
Univ de Metz	Metz
Univ Montpellier 2	Montpellier
Univ de Nantes	Saint Nazaire
Univ. d'Orléans	Bourges
Univ. Paris 7	Jussieu
Univ. Paris 11	Orsay

Univ. Paris 12	Créteil
Univ. Paris 13	St-Denis
Univ de Poitiers	Châtellerault
Univ de Reims	Reims
Univ de Rennes 1	Lannion
Univ. de Rouen	Rouen
Univ. de Rouen	Evreux
Univ. Jean Monnet	Saint-Etienne
Univ. de Strasbourg 1	Schiltigheim
Univ. Toulouse 3	Toulouse
Univ. de Valenciennes	Maubeuge

Brevet de Technicien Supérieur Génie Optique

Option photonique

Lycée Félix Le Dantec	Lannion (22)
Lycée Victor Bérard	Morez (39)
Lycée André Argouges	Grenoble (38)
Lycée Gustave Eiffel	Armantières (59)
Lycée Jean Mermoz	Saint-Louis (68)
Lycée Déodat de Severac	Toulouse (31)
Lycée d'optique Fresnel	Paris (75)
Cité des formations professionnelles L'Isle d'Espagne	(16)

Option Optique Industrielle

Lycée Victor Bérard	Morez
Lycée d'optique Fresnel	Paris
Lycée La Joliette	Marseille
Lycée Léonard de Vinci	Levallois Perret (92)

2.4 Les industries de l'optique

L'analyse du potentiel industriel français fait apparaître
des secteurs forts
des secteurs insuffisamment développés
des secteurs industriels disparus ou qui n'existent pas

L'**Optique ophtalmique** et la **lunetterie** restent les points forts de l'industrie de l'optique avec des entreprises comme *ESSILOR*, leader mondial pour les verres minéraux, *BBGR*, *Bourgeois*. Les verres sont minéraux ou organiques. Un grand nombre d'entreprises (PME en général) fabriquent des montures métalliques ou plastiques de lunette. Le territoire dispose d'un réseau complet de vente de lunette et matériels annexes.

Concernant le marché français de l'optique lunetterie en 2002 (source GFK) on trouve en France 29 millions de personnes portant des lentilles de contact ou des lunettes. Le taux de renouvellement moyen d'un équipement est de plus de 4 ans. Le marché total est de 3.11 milliards d'euros en croissance de 3.7% entre 2001 et 2002. Cette croissance est en partie tirée de la plus grande pénétration des produits à forte valeur ajoutée : verres progressifs, organiques, haut indice (1.74), photochromiques, traités anti-reflet. La répartition du marché en valeur est la suivante :

Verres de lunettes	59.8 %
Montures	23.5 %
Lentilles de contact	7 %
Produits d'entretien	2.7 %
Lunettes de soleil	7 %

En 2002, 21.6 millions de verre ont été vendus en France.

Le domaine de l'**optronique** (défense) est aussi un secteur d'activité important avec de nombreuses entreprises comme *Thalès*, *Sagem*, *EADS (dont Cilas)*, *Sofradir* leader mondial des détecteur IR, *Astrium* ou encore *Dassault*. Certaines de ces entreprises ont de très fortes interactions européennes et sont aussi présentes à l'international.

L'optique joue aussi un rôle de premier plan dans l'**avionique** avec *EADS(dont Cilas)*, *Eurocopter*, *Dassault* et dans le **spatial** qui utilise de nombreux instruments et composants de haute technologie (*Astrium*, *Alcatel Space*, *Seso*, *Sagem*, *Sodern*) et qui ont aussi de très fortes interactions européennes et sont présentes à l'international. Optronique, avionique, spatial font appel à la **visualisation**. C' est un secteur en plein développement (2.4 milliards d'écrans LCD dans le monde pour les téléphones et les jeux). Quelques entreprises françaises sont présentes sur ce créneau (*Thalès LCD*, *Nemoptic*).

Les **télécommunications optiques** après avoir connu une époque faste avec des développements importants se sont trouvées confrontées à une crise qui a vu diminuer la demande de systèmes. Mais le secteur reste un secteur fort avec la croissance des services et des capacités associées, le trafic des réseaux n'ayant cessé d'augmenter durant toute cette période. Les entreprises importantes sont Alcatel, Alcatel Space, Nexans, Avanex, ATI, Deutsch, auxquelles il faut ajouter les opérateurs tels France Telecom. Parallèlement, la

fabrication de composants optiques pour les télécommunications a chuté et de nombreuses entreprises qui oeuvraient dans ce domaine ont dû soit diminuer leur personnel (Highwave, Keopsys, Teem photonic, Opsitech), soit fermer (Nettest-Photonetics, Corning, Radiall), soit se séparer de leur fabrication (Alcatel Optronics est devenu Avanex avec une participation d'Alcatel au capital). D'un autre côté, la fabrication de fibre et câble par Alcatel est toujours fortement implantée en France et quelques PME font du câblage (Eurofo). Il reste de plus un tissu de petites entreprises souvent récentes (IFOTEC, Photline, Moduloptic, Optogone, Ekinops, Photon lines, Kyliya, Yanista, Silios, Kloé, DiLightSys, DALightcom, Aevix, ...) qui ont trouvé des créneaux porteurs. Les entreprises de **l'optoélectronique** ont été touchées par la chute du marché des télécommunications mais ont trouvé d'autres débouchés dans le multimedia, l'optronique, le médical, ... (Thalès, Sofradir, SESO, Keopsys, Pholine, ...).

Après le Japon, les Etats-Unis semblent amorcer une implantation importante de la fibre chez l'abonné (SBC Communication Inc.). Ceci amènera une nouvelle impulsion de très forte ampleur à ce secteur.

Le secteur des composants optiques autres que pour les télécommunications est inégal. Plusieurs sociétés réalisent des **composants optiques** tels que lentilles, miroirs, prismes (*Fichou, Alcatel vacuum technologie*) et des **systèmes optiques** complexes à base de composants de haute technologie (*Thalès Angénieux, Sodern, Sagem REOSC, Seso*). *Thalès Angénieux, REOSC* et *Seso* réalisent des composants asphériques en vue de l'intégration de ces composants asphériques dans des zooms par exemple. Une activité en croissance est celle de la réalisation de composants à base de matières plastiques (*Savimex, Gaggione, Hologramme industrie...*). On trouve aussi quelques entreprises qui font du calcul optique et qui vendent des logiciels (*Optis, Diffractif solution*). Mais une grande partie des composants est trouvée sur des catalogues et non français sur un marché international ouvert et concurrentiel. La réalisation des couches minces se fait dans quelques entreprises (*Thalès, Sagem, Cils, Tofico, HEF, Evap service*).

Dans le domaine **des lasers**, le marché est très important car il touche les procédés industriels, l'instrumentation, la métrologie et le contrôle, le domaine médical ainsi que la recherche. On compte 195000 lasers industriels au niveau mondial pour la découpe, le soudage, le marquage et le micro usinage avec un marché de milliards d'euros en 2002 dont 40 % en Europe. Il faut distinguer les fabricants de lasers de grande dimensions (CO₂, Nd :YAG, argon, à colorant ou vapeur de cuivre, femtoseconde..) des fabricants de lasers de plus petite dimension (neon pour l'alignement) ou de diodes lasers. On trouve des PME Françaises dans le domaine du laser mais le nombre est réduit par rapport au marché : *Cilas, SOPRA, Quantel, Thalès Laser, Thalès Laser Diodes, Laser Cheval, Amplitude Systèmes, Fastlight, Nettest, Highwave, Kéopsys, Nanolase*, C'est un marché où une grande partie de l'approvisionnement se fait à l'étranger (Allemagne, USA) par des réseaux de distributeur. On trouve par contre un grand nombre de sous traitants en usinage laser. Dans le domaine des diodes lasers mis à part Thalès Laser Diode les fabricants sont étrangers Allemands ou Japonais. La France est absente de la fabrication des VECSEL (Vertical Cavity Surface Emitting Laser). Plusieurs centres techniques lasers sont des outils à la disposition des industriels. La France dispose d'un potentiel important de laboratoires et de centre techniques et devrait pouvoir se développer dans ce domaine. Pour avoir une vision complète de ce domaine le lecteur peut se reporter au rapport complet fourni par le Club Laser et Procédés dans le tome 2.

Le **contrôle et l'instrumentation de mesure** sont des secteurs où l'industrie n'est pas aussi développée qu'elle devrait l'être compte tenu du niveau de la recherche effectuée dans les laboratoires. *Jobin Yvon* réalise des instruments scientifiques de laboratoires (spectromètres et monochromateurs), *Newport et Micromodule* des instruments spécifiques, *Nachet* des microscopes, *Sopra* des ellipsomètres et réflectomètres. Mais la grande majorité des appareils utilisés dans les laboratoires publics et privés sont achetés à l'étranger. En contrôle de forme des faisceaux, plusieurs sociétés fournissent des produits *Bertin*, *Techlab*, *Cotec*, *Imagine Optic* (capteurs optroniques tridimensionnels).

La fabrication de **matériaux passifs** (cristaux massifs et verre) est relativement absente en France mis à part *Saint Gobain*. Les verres spéciaux sont plus difficiles à trouver pour des problèmes de coût et parfois de réalisation du fait des produits de base toxiques utilisés. En matériaux actifs quelques sociétés fabriquent des cristaux : *Saint Gobain cristaux et détecteurs*, *Crystal laser*, *RSA Lerobis*.

La production mondiale annuelle de **disques optiques** est de l'ordre de quelques milliards, celle des DVD effaçables est aujourd'hui de 50 millions de disques et celle des DVD-R 3700 millions de CD-R et CD -RW. Ce marché est toujours en expansion et les disques optiques couvrent le marché des ordinateurs personnels (PC) et celui du multimédia. Les leaders mondiaux sont japonais, coréens et chinois. La France n'est présente que par deux fabricants qui sont *MPO* (disques enregistrables), *OEM* (gravure CD) et travaille en sous-traitance (tout en conservant la conception amont et en participant à la normalisation).

Le domaine grand public de la photographie classique ou numérique et du cinéma est absent du paysage industriel français à part *Thales Angénieux* qui fabrique des objectifs pour le cinéma et la télévision professionnel.

Le marché de **l'éclairage** est aussi un secteur important où peu d' entreprises sont présentes (*Philips éclairage*, *Schneider electric*) ainsi que le marché automobile avec la fabrication des phares de voiture de *Valeo* . Enfin dans le domaine de la conversion du rayonnement en énergie électrique seule une entreprise fournit des équipements (*Photowatt*).

Le domaine de la biophotonique est en accroissement mondial, mais à part le laser médical on note pour l'instant peu d'entreprises françaises sauf quelques petites PME dans les biopuces.

Remarques générales et suggestions

L'industrie de l'optique à autrefois (jusqu'en 1990) été soutenue par la Défense d'où elle a acquis un savoir faire important. La diminution de ces crédits a mis cette industrie en difficulté. Du fait d'avoir longtemps dépendu des marchés étatiques elle a eu des difficultés à aborder les marchés grand public. La crise des télécommunication a accentué les difficultés ainsi que la concurrence internationale.

Afin d'aider au développement des entreprises(petites ou grandes) dans la compétitivité actuelle il est nécessaire de renforcer les collaborations industrie recherche et d'aider les centres de technologie et/ou de transfert qui se mettent en place.

2.5 La recherche publique et industrielle

2.5.1 Potentiel

Le potentiel de recherche publique français en optique est important et concerne la recherche de base et la recherche appliquée publique mais il est plus réduit dans le domaine industriel où il se limite à quelques grands groupes.

On compte plus de 260 équipes, laboratoires ou unités qui sont répertoriées dans les différentes universités, organismes publiques et entreprises privées et qui travaillent en optique, optoélectronique et en imagerie et visionique. Les plus importantes sont répertoriées dans le tableau II.3 et la répartition géographique est donnée figure 2.3.

L'évaluation du nombre de chercheurs travaillant dans un domaine comme l'optique est toujours une opération délicate car les chercheurs peuvent aussi se situer dans d'autres domaines, la frontière entre les domaines étant parfois difficile à trouver. Par exemple les chercheurs qui sont rattachés à des unités de chimie peuvent être amenés à effectuer des travaux de développement de matériaux pour l'optique. Ceci est en particulier souvent le cas dans la recherche privée où les chercheurs travaillent sur des projets définis dans le temps et peuvent ultérieurement être affecté à des travaux dans d'autres domaines. Seuls les chercheurs appartenant à des équipes ou laboratoires bien identifiés sont plusaisés à décompter en particulier au CNRS, au CEA ou à l'ONERA.

Au CNRS, l'optique est présente dans plusieurs départements SPM, STIC, Chimie, INSU et SDU mais aussi maintenant en Science de la vie (SDV)

Le tableau 2.4 donne une évaluation du potentiel humain avec une erreur importante d'au moins $\pm 10\%$ car l'optique est une science diffusante et le décompte n'est pas simple. Le nombre total est certainement sous estimé car les techniciens ne sont pas pris en compte dans certains chiffres. La figure 2.2 indique la répartition géographique des centres de recherche en optique avec un poids important en région parisienne

On remarque encore à l'heure actuelle la faiblesse du potentiel de recherche industrielle toujours visible (23 % environ) et déjà signalée dans de précédentes études et rapports (voir rapport JERPHAGNON). Ceci est néfaste pour le transfert des connaissances et nuit au développement des industries de l'optique.

Cette population de chercheurs en optique est en augmentation depuis quelques années et correspond très approximativement à 2700 personnes et ne semble pas avoir évolué aussi vite que le besoin, mais elle s'est diversifiée. Le chercheur en optique est un physicien ou un chimiste et maintenant parfois un biologiste.

Tableau II.3*Estimation du potentiel humain de recherche*** hors opto électronique**** non communiqué (20% du CA est consacré à la recherche)***** ingénieurs et techniciens*

CNRS	
Département SPM Chercheurs	150
Enseignants chercheurs	270
Département STIC Chercheurs+ Enseignants chercheurs	413
Département Chimie Chercheurs et Enseignants chercheurs	100
Département INSU /SDU Chercheurs+ enseignants chercheurs	150
Département SDV Chercheurs et Enseignants chercheurs	80
Universités hors CNRS	100
CEA, CEA/LETI	350***
CEA LIST	10
CEA autres centres	200
ETCA	100
ONERA DOTA	120
Autres Laboratoires:	
LCPC	10
ISL	30
Thalès R&D	50*
Thalès autres centres	**
Alcatel (Marcoussis)	110
Essilor	400***
Saint Gobain	125
EDF	10

2.5.2 Recherche de base et recherche appliquée

Les recherches effectuées dans les unités du CNRS, les universités et les écoles d'ingénieurs sont orientées pour une grande part vers les études fondamentales, mais aussi vers les études appliquées. On assiste depuis quelques années à un effort sensible de collaboration avec l'industrie.

Dans les organismes tels que le CEA et l'ONERA les recherches sont en général plus orientées vers les applications.

La recherche privée est essentiellement effectuée dans les laboratoires des grandes entreprises comme Thalès, Essilor, Saint Gobain et Alcatel. Elle concerne essentiellement les applications mais aussi pour une partie la recherche de base. Dans les autres entreprises les thèmes développés sont liés à une production déterminée et sont en général très appliqués. Il existe peu de sociétés de recherche.

La recherche concerne tous les domaines de l'optique depuis les lois fondamentales de la matière, la physique atomique jusqu'aux matériaux et à l'astrophysique. Les domaines concernés sont les aspects photoniques, la nanooptique, l'optique quantique et atomique, l'optoélectronique, la visualisation et les images, les composants sans oublier les participations de l'optique aux grands systèmes ou instruments VIRGO, LISA, Laser Megajoule, Soleil, les champs des lasers de puissance pétawatt, les optiques XUV et les sources XFEL. Les recherches de base sont de bon niveau avec quelques points forts.

2.5.3. Principaux thèmes

Il n'est pas question de faire une liste exhaustive de toutes les recherches engagées mais de faire ressortir quelques points intéressants par leurs avancées et leurs développements futurs et de faire apparaître ceux qu'il faudrait développer. Le potentiel et les résultats donnent à la France une place reconnue internationalement et de haut niveau.

En recherche fondamentale des concepts nouveaux sont apparus qui ont ou auront des retombées dans les applications. On peut observer que les résultats des recherches ont permis d'obtenir pour certains paramètres fondamentaux de la physique une très grande précision.

Les avancées en **optique quantique** conduisent à la possibilité de traitement de l'information quantique, de calcul quantique et de cryptographie quantique (sécurisation de l'information) et permettent l'amplification à bruit réduit. Les boîtes quantiques ont conduit à la réalisation du laser bleu. Dans un laser UV à micropointes la zone active est constitué de boîtes quantiques GaN/AlGaIn émettant dans le domaine 250-350nm.

Le refroidissement des vapeurs atomiques par laser a conduit à former des faisceaux analogues pour l'onde de matière atomique à ce qu'est le laser pour le champ lumineux (laser à atome). Dans la **métrologie temps-fréquence** une des applications des atomes refroidis est le développement des horloges à fontaine atomique avec une exactitude meilleure que 10^{-15} . Des équipes travaillent à développer des horloges dans le domaine optique ce qui permettrait de gagner plusieurs ordre de grandeur.

De nouvelles **sources de lumière** sont apparues ces dernières années capables de fournir des puissances inespérées. Les lasers intenses reposent sur l'utilisation saphir dopé titane qui permet d'obtenir des impulsions ultra-brèves (qq fs) et / ou à cadence de tir élevée.

Des projets pétawatt (10^{15} Watt) de quelques centaines de joules sont à l'étude et en cours de développement dans un laboratoire universitaire CNRS (LULI) en région parisienne et au CESTA (CEA). Les lasers multi-terawatt sont commerciaux. L'arrivée de ces lasers de forte puissance ultra-intenses et leur interaction avec la matière ont engendré tout un champ de recherche. Par exemple l'interaction avec les plasmas permet la production de particules de haute énergie. L'interaction de ces lasers à haut flux engendre aussi la réalisation de sources de rayonnement X ou XUV cohérentes (laser X quasi cohérent), ou incohérentes. L'obtention de hautes fréquences et des impulsions de très courtes durées (laser femtoseconde) a ouvert un champ de recherche important dans différents domaines : recherche fondamentale, mécanique, biologie...La réalisation de diodes laser à semi conducteur émettant dans le bleu

est possible avec des matériaux comme GaN. Il est peut être possible d'aller vers des longueurs d'onde de 200nm.

Les développements de la **micro optique** issues des techniques de la microélectronique ouvrent un champ important de recherche. Ces études permettent de réaliser des objets de taille sub longueur d'onde et des systèmes Micro-Opto-Electro-Mécaniques (MOEMS) avec des applications dans divers domaines. Le CNRS a créé sur le thème de la **nanooptique** un programme « Nano sciences –Nanotechnologie » et un GDR « Optique en champ proche ». Le but est d'une part l'étude de micro et nano structures et d'autre part la réalisation d'objets de taille micrométriques et nanométriques. Les nanostructures photoniques ouvrent un large champ de recherche sur les matériaux et les méthodes de réalisation : structures à bande photonique interdite, nanolasers, nanodétecteurs. Les cristaux photoniques sont de nouveaux matériaux constitués de systèmes de trous submicroniques qui servent de gaine de confinements pour des guides telles que les fibres optiques ou des structures bidimensionnelles en optique guidée. Les microscopies à pointes (microscopie optique à champ proche par exemple) permettent de contrôler des nano objets. Le CEA s'intéresse aussi à ces sujets.

Dans le domaine des **ondes** et de leur **propagation** les études ont permis des avancées importantes. Il existe un GDR « Ondes » au CNRS qui regroupe des chercheurs de plusieurs départements. L'optique diffractive permet par exemple de créer des réseaux sub longueurs d'onde avec des applications en optique guidée ou en instrumentation. Les plasmons de surfaces qui sont des modes propres électromagnétiques qui se propagent à l'interface diélectrique métal sont à la base de composants optiques. En électromagnétisme les études théoriques se sont intéressées à la théorie des réseaux, à la cohérence dans les émissions thermiques. Le contrôle du dopage dans les fibres et les guides d'ondes d'ions tels que l'erbium a donné naissance aux amplificateurs et aux lasers à fibre. Les études en optique non linéaire ont porté sur les comportements temporels auto-organisés comme les autopulsations puis vers la dynamique spatio-temporelle. Les solitons qui sont des structure stables ont été observés dans les fibres et dans les VECSELs. En holographie le domaine émergent concerne les applications à la sécurité. La recherche internationale dans le domaine de **transmissions optiques** est très intensive et des progrès importants ont été réalisés en vue de transmissions haut débit. Des domaines de recherche intéressants concernent les techniques de multiplexage, le développement de sources laser à faible bruit, l'amplification optique, la régénération des signaux, le routage optique, la sécurisation, les interconnexions, les réseaux tout optiques. C'est un domaine où la recherche en France est bien positionnée sauf dans le domaine public applicatif, et le vide laissé par la diminution d'activité du CNET n'est pas comblé par la recherche publique.

En ce qui concerne les **matériaux pour l'optique** les études se sont beaucoup développées. C'est un secteur dynamique qui s'appuie au CNRS sur un programme inter département « Matériaux, sur des GDR « Cristaux photoniques et microcavités » « Matériaux laser » « Matériaux et fonctions de l'Optique Non Linéaire » et sur un réseau « Cristaux massifs et dispositifs pour l'optique ». Dans le cadre du CEA c'est au CEREM que sont développées les études des matériaux pour l'optique ainsi qu'au LETI. Sans faire une énumération complète des matériaux intéressants étudiés on peut citer quelques exemples importants par leurs applications en optique macroscopique, en optoélectronique, en

télécommunications optiques, ou en optronique : le Silicium sur isolant SOI, SiGe, le carbure de silicium SiC, le diamant, les matériaux grand gap tels GaN, les matériaux III-V et II-IV pour les sources, les céramiques, les cristaux photoniques, les matériaux luminescents, les matériaux photoréfractifs avec des applications en holographie dynamique.... Enfin les matériaux polymères conduisent à des applications diverses telles l'électroluminescence organique qui conduit à la réalisation de nouvelles sources (OLED). Le procédé sol-gel permet de réaliser des couches de revêtement de manière plus simple et efficace.

En **instrumentation** les méthodes optiques ont fait des progrès en sensibilité sur des montages interférométriques (instrument VIRGO), en résolution avec la microscopie optique à champ proche, en détection à partir des systèmes LIDAR (Light Detection And Ranging). Les réseaux de Bragg implantés dans les fibres ont permis de créer de nouveaux composants développés initialement pour des applications qui relèvent du domaine des télécommunications et qui maintenant couvrent les capteurs.

Les recherches sur les applications de l'optique dans le domaine de la **biophotonique** et des sciences du vivant sont effectuées dans un certain nombre de petites équipes avec quelques succès. C'est un domaine à renforcer.

Les chercheurs nationaux participent aux congrès internationaux et européens mais se retrouvent aussi autour de colloques nationaux par discipline qui favorisent les échanges et les collaborations: COLOQ, Journées Nationales d'Optique Guidée (JNOG), Horizons de l'optique, CEMOI....

Grands instruments au niveau national

Laser Mégajoule : Implanté en région Aquitaine au CESTA/CEA, il entre dans le cadre du programme de simulation du CEA. Il fait largement appel à des laboratoires d'autres régions et à des entreprises réparties sur tout le territoire. Il sera opérationnel en 2008. Une première ligne (Ligne d'intégration Laser LIL) sert à valider les choix technologiques. Un partenariat entre le CEA, le CNRS et l'université de Bordeaux permet des collaborations scientifiques.

Virgo :Projet de détection des ondes gravitationnelles, il nécessite des miroirs très élaborés ne présentant ni absorption, ni diffusion, ni biréfringence. Confectionnés en Allemagne par Heraeus, ils sont polis à $\zeta/100$ aux USA. Le traitement diélectrique multicouche est réalisé à l'IPNL / SMA Lyon.

VLT (Very Large Telescope) de l'ESO (European Southern Observatory) est installé au Chili. Il comporte des miroirs de 8.2 m avec une qualité de miroir de 8.5 nm (poli par SAGEM) et un système d'optique adaptative (fourni par l'ONERA).

Projet Soleil Source de rayonnement synchrotron à très forte puissance

Remarques et suggestions

Dans l'ensemble la recherche de base française est de bon niveau avec des équipes reconnues internationalement. Il est très important de maintenir ce niveau.

On note quelques domaines où il y a peu d'équipes: le domaine applicatif, le transport d'énergie, le solaire... par rapport aux enjeux économiques.

Dans la recherche publique on assiste à des regroupements intéressants de laboratoires et de centres qui font des recherches du même type afin de mutualiser les moyens lourds et de se faire reconnaître au niveau européen. Ces regroupements sont signalés en 2.6 et sur la figure 2.3.

Il est nécessaire de mieux coupler la recherche publique avec le secteur industriel et de faciliter le développement de la recherche appliquée. (voir §2.6)

Le développement des applications de la recherche et des technologies pour passer du domaine du laboratoire aux produits industrialisés est le maillon faible car il n'est pas valorisé en recherche universitaire, et difficile pour les TPE (Très Petites Entreprises) compte tenu des financements.

La recherche peut être affaiblie dans les années à venir car lorsqu'une fabrication est délocalisée vers l'Asie ou l'Europe de l'est la R&D suit et ensuite la recherche qui tend à être proche de la fabrication.

Répartition géographique des principaux centres de recherche en optique

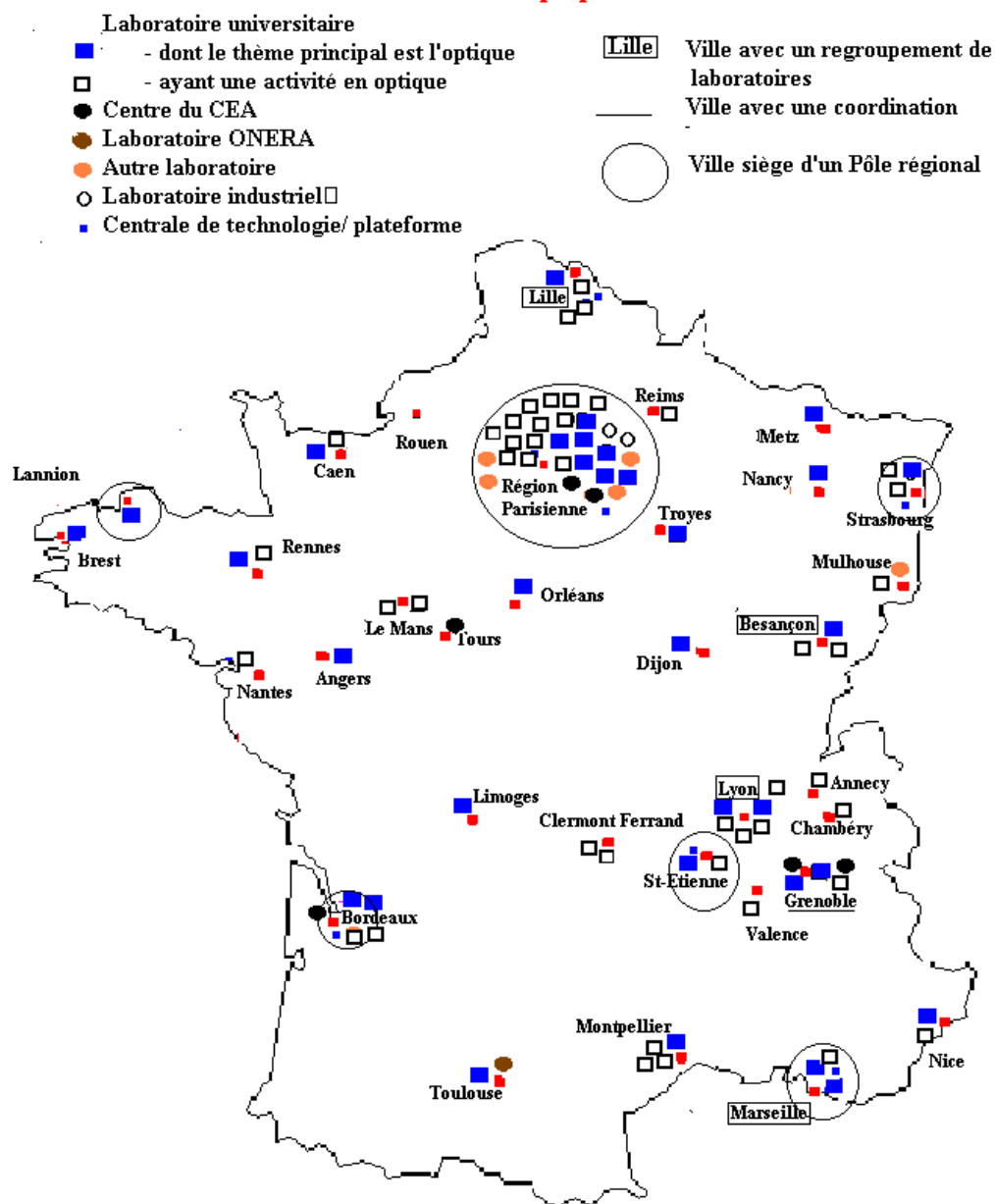


Figure 2.3

TABLERAU II-4

Principaux Centres de Recherche (liste non exhaustive)

Région, Ville, Etablissement et Organisme de rattachement, Intitulé

Les centres soulignés ont l'optique comme axe principal de recherche

Alsace

Strasbourg

UMR7504	Strasbourg1	CNRS	Institut de physique et chimie des matériaux (IPCMS)
UPR 292	ENSPS	CNRS	Laboratoire de Physique et Applications des SEMiconducteurs (PHASE)
			<u>Laboratoire des systèmes photoniques</u>

Mulhouse

UMR 7525	ENSC	CNRS	Département de photochimie générale Institut Saint-Louis

Aquitaine

Talence

UMR5798	Bordeaux 1	CNRS	<u>Centre de physique moléculaire optique et hertzienne (CPMOH)</u>
UMR5107	Bordeaux 1	CNRS	<u>Centre des Lasers Intenses et Applications (CELIA)</u>
UMR 5501	ENSCP	CNRS	Physique des interactions ondes matières (PIOM)
UPR 9048	Bordeaux 1	CNRS	Chimie de la Matière Condensée de Bordeaux (ICMCB)

Cesta

CEA	Centre de Cesta	LMJ	

Auvergne

Clermont-ferrand 2

UMR 6602	UBP	CNRS	Laboratoire des Sciences et Matériaux pour l'Electronique et d'Automatique (LASMEA)
UMR 6002	UBP	CNRS	Matériaux inorganiques

<u><i>Bourgogne</i></u>			
Dijon			
UMR5027	U Dijon	CNRS	<u>Laboratoire de physique de l'Université de Bourgogne</u>
<u>Bretagne</u>			
Rennes			
UMR6627	Rennes1	CNRS	<u>Physique des atomes, lasers, molécules et surfaces</u>
UMR6512	Rennes1	CNRS	<u>Verres et Céramiques</u>
Lannion			
	ENSSAT	CNRS	<u>Laboratoire d'optronique</u>
Brest			
FRE 2269	UBO,ENST	CNRS	Laboratoire d'électronique et système de communications
<u><i>Champagne Ardennes</i></u>			
Reims			
UMR6089	U Reims	CNRS	Groupe de spectroscopie moléculaire et atmosphérique
Troyes	UTT		Laboratoire de nanotechnologie et d'Instrumentation Optique (LNIO)
<u><i>Centre</i></u>			
Orléans	Univ	CNRS	Groupe de recherche sur l'énergétique des milieux ionisés
Tours		CEA	Centre du Ripault
<u><i>Franche-Comté</i></u>			
Besançon			
UMR 6603	UFC	CNRS	<u>Laboratoire d'Optique Pierre –Michel Duffieux (LOPMD) dont CREST Belfort</u>
UMR 6624	UFC	CNRS	<u>Laboratoire de physique moléculaire</u>
UPR 3203		CNRS	<u>Laboratoire de Physique et Métrologie des Oscillateurs (LPMO)</u>
<u><i>Ile de France</i></u>			
Aubervilliers			
UMR125	ST-Gobain	CNRS	Surface du verre et interfaces
Paris			

UPR5	ESPCI	CNRS	<u>Laboratoire de Spectroscopie en lumière polarisé</u>
UMR7601	Paris 6	CNRS	Laboratoire d'optique des solides
UMR8552	ENS,Paris6	CNRS	Laboratoire Kastler Brossel
UMR 7588	Paris 6,7	CNRS	Groupe de physique des solides
			Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC)
UMR 7574	Paris 6	CNAM	INM BNM
Marcoussis		CNRS	Matériaux inorganiques
UPR20	CNET	CNRS	<u>Laboratoire de photonique et de nanostructures</u>
Cachan			
UMR	ENS	CNRS	Laboratoire de Photonique Quantique Moléculaire
Marcoussis			Centre de recherche Alcatel
Palaiseau			
	Ec. Pol, Pa 6	CNRS	<u>Laboratoire pour l'Utilisation des Lasers Intense (LULI)</u>
UMR7639	Ec. Pol	CNRS	Laboratoire de physique des interfaces et des couches minces
UMR7645	Ec Pol, ENSTA CNRS		<u>Laboratoire. d'Optique Appliquée (LOA)</u>
	Ec Pol, ENSTA,INSERM,CNRS		Laboratoire d'optique et biologie
			Centre de recherche Thalès R&T
Orsay			
UPR332		CNRS	Laboratoire Aimé Cotton
UMR 8624	Paris 11	CNRS	<u>Laboratoire des Interactions des X avec la Matière (LIXAM)</u>
UPR 3361		CNRS	Laboratoire de Photophysique moléculaire
UMR 8501	IOTA	CNRS	<u>Laboratoire Charles Fabry</u>
UMR 8622	Paris11	CNRS	<u>Institut d'Electronique Fondamentale(IEF)</u>
	CEA	CNRS	Laboratoire pour l'utilisation du rayonnement électromagnétique
UMR8634	Versailles	CNRS	Laboratoire de magnétisme et d'optique de Versailles
UMR 8578	Paris 11	CNRS	<u>Laboratoire de Physique des gaz et des plasmas</u>
Saclay			CEA LIST DIMR /SIAR
		CEA	SPAM
		CEA	CEA/DSM
		CEA	DRECAM
		CEA	

Villetaneuse			
UMR7538	Paris13	CNRS	<u>Laboratoire de physique des lasers</u>
<u><i>Languedoc-Roussillon</i></u>			
Montpellier			
UMR 5507	USTL	CNRS	Centre d'Electronique et de Micro-optoelectronique de Montpellier (CEM2)
UMR5587	USTL	CNRS	<u>Laboratoires des verres</u>
UMR 5070	ENSC	CNRS	Laboratoire de chimie moléculaire
FR 1878	USTM	CNRS	Chimie de la Matière Condensée de Montpellier (ICMCM)
<u><i>Limousin</i></u>			
Limoges			
UMR 6615	U Limoges	CNRS	<u>Institut de Recherche en Communications Optique et Micro-ondes (IRCOM)</u>
Lorraine			
Nancy			
UMR 7639	ENSIC	CNRS	Département de Chimie Physique des Réactions (DCPR)
Metz			
FRE2304	U Metz	CNRS	<u>Laboratoire matériaux optiques, photonique, systèmes</u>
<u><i>Midi Pyrénées</i></u>			
Toulouse			
UPR 8001		CNRS ONERA	LAAS équipe de photonique DOTA
Nord pas de Calais			
Lille			
UMR 8520	Lille 1	CNRS	Institut d'Electronique et de Microélectronique du Nord (IEMN)
UMR 8523	Lille 1	CNRS	<u>Laboratoire de physique des lasers, atomes et molécules</u>
UMR8024	Lille 1	CNRS	<u>Laboratoire de dynamique et structure des matériaux moléculaires</u>
UMR8516	Lille 1	CNRS	Spectrochimie Infrarouge et Raman (LASIR)

Normandie

Caen

UMR 6637 U Caen CNRS
UMR 6508 U Caen CNRS

Centre interdisciplinaire de recherche ions lasers
Cristallographie et Science des Matériaux (CRISMAT)

Pays de Loire

Le Mans

Univ CNRS

Laboratoire d'acoustique de l'université du Maine
Equipe de physique de l'état condensé
Laboratoire des Fluorures

Angers

UMR6136 U Angers CNRS

Laboratoire des propriétés optiques des matériaux et applications

Nantes

UMR6502 U Nantes CNRS

Institut des Matériaux de Nantes

Provence –Alpes –Cote d’azur

Marseille

UMR 6133 ENSPM CNRS

Institut Fresnel

UMR 6633 Aix Marseille1 CNRS

Physique des interactions ioniques et moléculaires

UMR 6110 CNRS

Laboratoire d'Astrophysique de MARSEILLE

Nice

UMR6622 CNRS

Observatoire de Nice

UMR 6162 Observatoire CNRS

Laboratoire de physique de la matière condensée

Interférométrie laser pour la gravitation et l'astrophysique (ILGA)

Rhône Alpes

Lyon -Villeurbanne

UMR 5620 UCB CNRS

Laboratoire Physique des matériaux luminescents

UMR5579 UCB CNRS

Laboratoire de Spectrométrie ionique et moléculaire

UCB CNRS

Equipe fabrication des miroirs de l'interféromètre VIRGO

UMR 5511 INSA- CNRS

Laboratoire de Physique de la Matière(LPM)

Lyon-Ecully

UMR 5512 ECL CNRS

Electronique, Optoélectronique et Microsystèmes (LEOM)

FRE 2608	ECL	CNRS	Ingénierie et Fonctionnalisation des Surfaces (IFOS)
St-Etienne			
UMR 5516	UJM	CNRS	<u>Traitement du Signal et Instrumentation</u>
	UJM	DIOM	
Grenoble St-Martin d'hères			
UMR5588	UJF	CNRS	<u>Spectrométrie physique</u>
UPR 5031		CNRS	Laboratoire de Cristallographie
UMR 5136	INPG	CNRS	<u>Institut de Microélectronique, Electromagnétisme et de Photonique (IMEP)</u>
		CEA	LETI
		CEA	DSM/DRFMC
Chambéry			
	Univ de Savoie		Laboratoire d'Hyperfréquences et Caractérisation (LAHC)
Annecy			
	Ec. Sup. d'Ingénieurs		Laboratoire d'instrumentation et de matériaux (LAIMAN)
Valence			
	ESSISAR/ INPG		Laboratoire de Conception et d'Intégration des Systèmes

2.6 Le transfert de la recherche vers l'industrie

Un certain nombre d'outils favorisent la collaboration entre le milieu de la recherche publique et l'industrie. On peut les classer en quatre grandes catégories.

a) Travaux en collaborations via

- *les contrats directs entre industriels et laboratoires

- *les conventions CIFRE (Conventions Industrielles de Formation à la REcherche) qui sont des conventions de formation en Entreprise avec une aide de l'ANRT.

- *les bourses cofinancées CNRS-industrie, les bourses régionales.

- *les collaborations autour de projets dans les **contrats européens** mêlant industriels et laboratoires. Un reproche fait par les très petites entreprises est que ces contrats sont lourds et difficilement accessibles.

Il faut signaler le rôle des services de valorisation créés dans les universités et qui aident à la mise en place de ces relations. Les SAIC (Service d'Activités Industrielles et Commerciales) créés par le ministère dans certaines universités relèvent de cette politique. Dans certaines universités des sociétés de transfert ont été créées.

b) Les réseaux technologiques

Les réseaux de recherche technologiques mis en place par le ministère permettent de financer des projets dans lesquels des objectifs de recherche réunissent chercheurs du domaine public et chercheurs du domaine industriel. L'objectif de ces réseaux est de favoriser une recherche permettant de lever de verrous technologiques. Deux réseaux intéressent principalement les opticiens :

- le réseau Réseau Micro Nano Technologie (RMNT),
- le réseau Réseau National de Recherche en Télécommunication (RNRT).

D'autres réseaux peuvent les concerner (tel le RNMP Réseau National Matériaux et Procédés) mais l'optique y occupe une part plus faible.

Le **réseau RMNT** a pour champ d'application l'étude d'objets de très petites dimensions pouvant aller jusqu'à la taille d'une molécule : dimensionnement, fonctionnement, fabrication collective et caractérisation. Il fait appel à plusieurs disciplines électronique, optique, mécanique, biologie. Le champ d'application couvre de nombreux secteurs : la microélectronique, l'optoélectronique, les microsystèmes, les microcomposants, les nanosystèmes, la conception, l'assemblage, l'hybridation et la connectique, les périphériques, les biotechnologies, les équipements de production dont certains concernent directement l'optique. Il est piloté par un comité d'orientation représentant les laboratoires publics et les entreprises, et le fonctionnement permanent du réseau est assuré par un bureau exécutif piloté par le LETI. Les priorités affichées sont à partir de la prise en compte de la demande économique de rassembler les compétences et de faire émerger des projets à finalités

industrielles en cherchant à résoudre des problèmes de haute valeur technologique. Il vise à impliquer fortement les PME / PMI. Il organise en collaboration avec le club Nano-Microtechnologies des journées d'études.

Le **réseau RNRT** a pour champ d'application les télécommunications, un secteur stratégique en France et s'intéresse à ce qui touche à la société de l'information : haut débit, prochaines générations de téléphones mobiles multimédia, satellites, à la convergence de audiovisuel, des télécommunications et de l'informatique. Dans le secteur de la recherche amont en télécommunications il incite les laboratoires publics, les grands groupes industriels et les PME à coopérer autour de projets. Il est organisé autour d'un comité d'orientation qui le pilote et d'un bureau exécutif qui évalue les projets et l'anime, et des commissions dont l'une concerne les technologies optiques et hertziennes. Ce réseau labellise depuis 1998 trois types d'actions : projets exploratoires, projets précompétitifs, plate-formes. Sur les deux premières catégories entre 10 et 20 % des actions concernent des projets à forte implication de l'optique. Les projets correspondent à des partenariats de 4 à 5 partenaires (laboratoires, grands groupes, PME). Un bilan de l'action de ce réseau est disponible sur le WEB (Cartographie des thèmes de recherche soutenus par le RNRT)

c) Les incitations régionales et les Pôles régionaux

Certaines Régions ont une politique de développement scientifique et des lignes de développement économique qui s'intéressent aux retombées des résultats des recherches sur les entreprises locales. Sur des programmes définis, elles accordent des aides à la recherche et aux applications vers l'industrie en offrant des bourses de recherche ou des bourses post doctorales ou des financements de projet de recherche.

De ces politiques sont nés les pôles régionaux en optique dont l'objectif est de mettre en relation sur des sujets traités en commun des chercheurs des établissements publics et des ingénieurs des entreprises. Ils ont aussi un rôle de promotion et d'incitation à la formation aux métiers de l'optique. Certains sont pourvus de matériels de haute technologie, parfois rare compte tenu de leur coût, sur lesquels sont mis au point soit des procédés soit des composants soit des matériaux en vue de leur application industrielle. Ces équipements et parfois les bâtiments qui les abritent sont financés sur des crédits publics (Régions, Etat, Europe, Collectivités locales) et affectés à une Université ou une Ecole. La participation industrielle se fait par apport d'ingénieurs et de matériels. Leur mission peut se résumer sur le schéma donné figure 2.3.

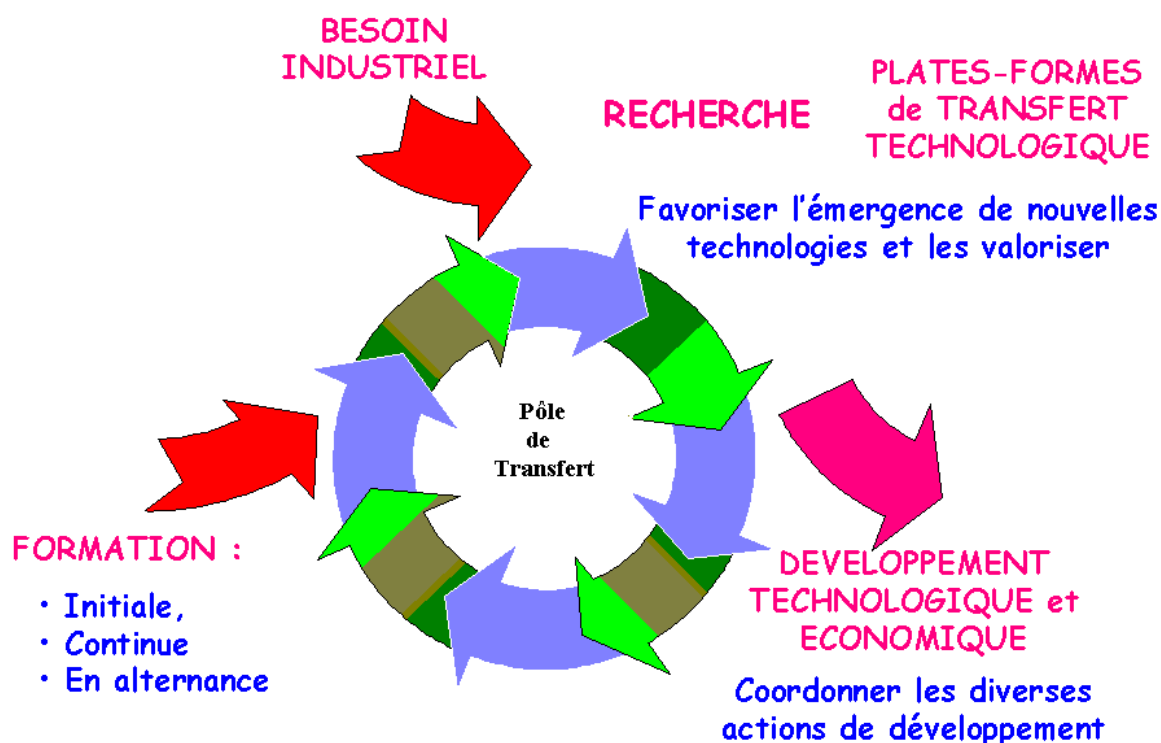


Figure 2.4

Missions d'un pôle technologique
(Schéma extrait d'un document POV St-Etienne)

Les moyens de ces pôles sont inégaux et ne couvrent pas tous la même réalité mais les objectifs sont clairs : les régions et collectivités locales investissent en vue de la création d'activité, d'entreprise et d'emplois (voir tableau II-5). Il existe donc une complémentarité entre ces pôles, qu'il faut essayer de maîtriser dans un intérêt national. Cette harmonisation pourrait être une des missions du CNOP.

En Bretagne **Anticipa** (Lannion) a été lancé en 1985 avec la présence du CNET, l'optique représente une partie des activités.

En Rhône Alpes le **Pôle Optique et Vision** (POV) à Saint-Etienne a été mis en route en 1994 sous l'impulsion d'universitaires du Laboratoire TSI et d'industriels dont Thalès Angénieux et créé en 1996 sous l'égide de la Région et de l'Etat. Des représentants d'établissements universitaires, d'écoles d'ingénieurs, d'industriels et de centres de recherche de la région Rhône Alpes constitue son conseil d'administration. Il est doté de 9 plateformes technologiques. **Alpes Optique et Photonique** (Grenoble) est une initiative de coordination très impliquée dans la formation.

En région parisienne **OpticsValley** (Palaiseau) créé en septembre 1999 est le pôle le plus important compte tenu du potentiel de la région (à peu près 50 % du potentiel français) avec de grands laboratoires publics et privés (IOTA, Thales R&T, LOA, LULI, Laboratoire de Marcoussis ...) des entreprises comme Alcatel, Thales Il est à l'origine de plusieurs actions d'animation nationale.

Le **Pôle Optique et Photonique sud** (POPsud Marseille) qui structure Marseille, Nice et Toulon a été créé en mai 2000 et est doté d'équipements. Un point fort est l'Institut Fresnel né du regroupement de trois laboratoires marseillais et l'ensemble des secteurs de l'astrophysique.

Sur Bordeaux plusieurs actions existent dans le domaine de l'optique autour de la route des lasers : la Plate-forme Aquitaine des Lasers et de leurs Applications (**PALA**), le Centre Lasers Intenses et Applications (**CELIA**), l'Agence Aquitaine Développement Industriel (**2ADI**), le CEA et le laser Mégajoule. Un regroupement est en cours et un pôle devrait voir le jour en fin d'année.

Le pôle **Rhena-Photonique** en Alsace est en création (Strasbourg/Mulhouse) avec des liens aux structures identiques et voisines développées en Allemagne.

Les caractéristiques de ces structures sont données dans le tableau 2.5.

D'autres régions ont une activité optique à proximité de laboratoires important dans le domaine de l'optique et plusieurs laboratoires ont l'intention soit de se fédérer soit de fusionner pour avoir une taille critique

- l'IRCOM à **Limoges**.
- **Franche Comté** à Besançon :Unité FEMTO fusion regroupant 5 laboratoires (LPMO, L. Duffieux, LMA, LCEP et CREST (Belfort/ Montbéliard).
- **Lille**. Le CERLA (Centre d'étude et de recherche lasers et applications) regroupe 5 laboratoires.

Les difficultés de mise en place et de fonctionnement de ces Pôles ne sont pas essentiellement financières mais **culturelles**. Faire coïncider une demande industrielle pressée par la compétitivité internationale sur des sujets de haute technicité avec les contraintes de la recherche universitaire n'est pas une opération simple. Compte tenu des obligations des chercheurs vis à vis de leurs charges (recherche personnelle, enseignements..) ils sont souvent peu enclins à se lancer sur d'autres sujets. De plus la répartition des charges financières entre les partenaires industriels et l'établissement public pour l'utilisation et l'entretien du matériel est souvent une suite de longues mises au point. Le manque criant de personnel technique affecté uniquement à ces programmes de collaboration est un handicap lourd et la cause principale de l'arrêt de certaines actions dès que le premier résultat a été obtenu et qui empêche d'élargir le champ de transfert ou de chercher à aller au delà des premiers objectifs. Malgré ces difficultés ces opérations commencent à porter leurs fruits en dynamisant les contacts et en créant de véritables équipes communes. Les premières créations d'emploi et de sociétés sont en train de se produire. Il reste à consolider ces initiatives et à les aider dans cette phase de développement, sinon elles vont disparaître.

c) Les aides à la création d'entreprises

Lorsque les recherches entreprises peuvent déboucher sur la création d'entreprise des **incubateurs** d'entreprises ont été créés dans toutes les Régions et près des centres universitaires pour aider le chercheur dans ses démarches et à développer son projet.

L'assouplissement des règles et contraintes liées à la création d'entreprises est un élément favorable pour amplifier ce mouvement de créations d'entreprises innovantes.

En ce qui concerne les jeunes entreprises en optique, elles sont créées soit à partir de recherches développées dans des laboratoires publics parfois suite à des travaux soutenus dans les réseaux de recherche nationaux, soit avec le soutien de grandes entreprises. Les premières années elles bénéficient directement des fruits de la recherche et reste en contact avec le laboratoire tant que c'est nécessaire. Pour toutes ces petites structures récentes, si l'entreprise est innovante elle peut bénéficier de crédits ANVAR, de prêts remboursables et parfois de capitaux risqués. Les contacts avec certaines (Génoptic, SIMAG, Photline, IFOTEC ...) montrent qu'elles rencontrent un certain nombre de difficultés : - accès difficile aux programmes européens du 6^{ème} PCRD (difficultés de justifier une somme équivalente en personnel à celle des investissements) voir impossible (mobilisation conséquente en temps et en moyens pour le montage du dossier, frais très élevés si le dossier est monté par un consultant, absorption des idées à travers un consortium de grandes sociétés) – le caractère remboursable de l'ANVAR qui diminue l'actif. Il est parfois suggéré que les financements de l'ANVAR aient une partie subventionnée et une partie remboursable.

d) Autres lieux de rencontre

Enfin il existe des structures, qui regroupent, en dehors des pôles régionaux, des industriels (en général des PME) et des laboratoires de recherche. Ce sont des clubs ou associations souvent non subventionnés qui portent sur des thématiques particulières. Ils sont proches des centres de recherche ou d'organismes publics ou de sociétés savantes: Club nanotechnologie, Club CEMOI (SFO), Club optique (SFO), Clubs CRIN CNRS, Club Visualisation, ARUFOG, Club laser et Procédés....

Remarques générales et propositions

De manière générale la collaboration entre universitaires et demande industrielle n'est pas simple à développer(que ce soit dans le cadre des pôles ou non). Le chercheur doit tenir compte de ses propres programmes dans le cadre des contrats passés entre les organismes et le Ministère de tutelle. Même si ces derniers ont assoupli leur position et incitent ouvertement au transfert, l'avancement des chercheurs se fait encore essentiellement sur les publications scientifiques et sur leurs propres thèmes de recherche. Or les besoins industriels ne coïncident pas toujours avec ces thèmes et avec les objectifs des chercheurs, ceci conduit à affaiblir la recherche à finalité d'application et les développements des composants critiques au niveau des branches industrielles.

Il est important de permettre aux entreprises d'accéder aux résultats de la recherche publique et à des équipements qu'ils ne peuvent avoir en propre. La création d'équipe mixte industrie et laboratoire public est un moyen privilégié d'acquérir et de développer l'esprit de collaboration de même que les thèses cofinancées.

Pour aider à la bonne marche des programmes de transfert c'est à dire dans le cadre de création d'entreprise ou de fonctionnement d'équipements lourds dans le cadre des pôles il serait bon de créer des postes d'ingénieurs de développement qui pourraient effectuer le

travail technique. Ces personnels travailleraient avec le créateur d'entreprise durant 1 an pour l'aider dans la partie technique et sur les équipements lourds pendant la phase de développement du programme.

Il serait utile de pouvoir harmoniser les rapports entre les structures « Pôles » de type privé et les services universitaires chargés des relations industrielles par le biais de conventions.

Il faut aussi ouvrir des possibilités d'initiation de thèmes de recherche par l'industrie.

	Pôle Optique Vision	OpticsValley	POPsud	Anticipa	2ADI	Optique et Photonique	Rhénapho- tonique
	S-Étienne	Palaiseau	Marseille	Lannion	Bordeaux	Grenoble	Strasbourg
Création	07. 1996	09. 1999	05.2000	1985	En création	10.2000	En création
Président	D.Levailant	J.Jerphagnon	J.Boulesteix	R.LeGouguec		M.Origlio	P.Smigielski
Délégué	G.Corbasson	M..Klein	S.Ungar	P.Jézéquel		P.Baldeck	
Permanents	2.5	20	3	5	-	-	-
Equipements	8 M€	-	1 M€	500K€	-	-	-
Bâtiments	30 M€		-		-	-	-
Fonctionne- ment annuel	150 K€	2.5 M€	400 K€	100 K€	-	18 K€	-

Tableau II- 5

Structures régionales existantes

Chapitre 3

TECHNOLOGIE DE L'INFORMATION ET TELECOMMUNICATIONS (TIC)

3.1. Introduction

Ce nouveau siècle verra l'avènement de 'l'âge numérique' construit sur l'accès personnel en tout lieu et à tout moment de l'information multimédia (musique, images animées, données). La disponibilité de ces services sera basée sur un ensemble de technologies, rendues disponibles à prix abordable par un haut niveau de recherche & développement guidant les choix du futur. L'Europe a une position de leader, qui repose sur sa large base d'utilisateurs potentiels et sur sa capacité à exploiter et valoriser l'innovation technologique.

Cette évolution durant les toutes prochaines années vers une industrie de services et de contenu d'information requiert un immense travail. Il est bien connu que l'industrie de l'information et des télécommunications connaît un sévère retournement de situation. Il nous faut traverser cette crise tout en maintenant et préparant notre compétitivité future. Nous serons ainsi prêts et en position favorable lors du retour à une situation de croissance, sous peine d'être dépassés. A ce titre, les acteurs européens et français, académiques et industriels, doivent travailler ensemble sur des programmes de R&D d'envergure significative.

L'optique a une place de choix dans ce contexte. Elle est aujourd'hui le support idéal à la couche de transmission dans les réseaux fixes, en offrant la capacité nécessaire à moindre coût entre les nœuds. L'optique commence aussi à apporter une flexibilité élémentaire, à travers commutateurs et sous-systèmes accordables. Néanmoins, un réseau complet nécessite un ensemble large de technologies, non seulement optiques, mais également électroniques, logicielles et architecturales. Ces technologies ne doivent pas être à proprement parler en compétition, mais doivent trouver chacune leur espace de façon harmonieuse. Il en est de même pour le traitement de l'information, comme dans les applications de l'optique dans l'ordinateur, le stockage de masse, etc. Ainsi, une approche verticale, avec l'intégration complémentaire des différentes technologies, doit être entreprise avec pour objectif de proposer des solutions systèmes complètes. L'on comprend ainsi dès à présent que la réelle collaboration entre les différentes expertises sera nécessaire, à travers un couplage fort entre recherche académique et applications industrielles.

Le présent chapitre de ce livre blanc présente les forces et faiblesses de l'optique dans les TIC en France, en se concentrant sur les aspects 'systèmes' et 'fonctions', les aspects 'composants' et 'sous-systèmes' étant traités par ailleurs. Il résulte de la collaboration d'experts reconnus du monde académique et industriel. Leurs principales recommandations générales sont résumées. De nombreuses autres recommandations, tant scientifiques que techniques, ont été également proposées ; celles-ci sont disponibles en annexe à travers les contributions détaillées, dont la lecture sera riche d'information.

3.2. Forces et faiblesses, et recommandations particulières

Les technologies optiques trouvent leur place dans la couche photonique des réseaux, en particulier pour la fonction de transmission et celle de commutation/routage, et dans certaines

fonctions du traitement de l'information. Parmi les grands moteurs 'systèmes', l'on trouvera la diminution du coût de la transmission, via non seulement les composants mais aussi selon la conception des systèmes par exemple en réduisant le nombre de régénérateurs de signaux, l'introduction progressive de la flexibilité au niveau optique et ainsi aller au-delà de l'utilisation de l'optique comme simple moyen de transmission fixe entre deux nœuds de réseau. Une liste, non exhaustive, des technologies optiques de la transmission, de la commutation et de l'information qui requièrent une forte activité R&D concertée, est :

- ## *Transmission : les formats de modulation améliorés, les techniques de compensation de dispersion (à forte efficacité, par bande, accordable, de PMD), l'amplification améliorée (par effet Raman, par l'égalisation de gain adaptative, à bas coût), la régénération de signaux, le transport des micro-ondes analogiques.*
- ## *Commutation : les multiplexeurs à insertion/extraction reconfigurables, les multiplexeurs/démultiplexeurs de canaux, les émetteurs et filtres accordables, les commutateurs spatiaux, les commutateurs de longueurs d'onde.*
- ## *Traitement de l'information : technique de stockage massif, interconnexion, éléments non linéaire de décision, technique de cryptographie.*

Plusieurs de ces points sont repris ci-dessous.

3.2.1. Emission/réception de l'information ; format de modulation ; cryptographie

Généralités

Le multiplexage en longueurs d'onde sur fibre optique amplifiée (ou transmissions WDM) a ouvert la voie aux transmissions de forte capacité, tout en permettant la réduction drastique du coût du bit transmis. L'optique joue un grand rôle à ce niveau et ces sujets sont fortement reliés aux composants photoniques, passifs ou actifs. Les objectifs des recherches sont l'optimisation de la qualité spectrale, de l'efficacité (densité spectrale d'information) et la diminution des effets de propagation linéaire et non linéaire, à travers l'étude des formats de modulation. Un autre axe important est l'intégration de multiples fonctions optiques sur une même puce, afin de proposer ainsi des dispositifs compacts. Les méthodes de modulation pour les applications de l'accès, telle la fibre chez l'abonné FTTH et ses variantes, constituent aussi un large domaine d'activités, impliquant l'innovation au niveau du format (CDMA, sources à large spectre, ...), la mise au point de composants légers, fiables, à faible encombrement et consommation.

La réception est aussi cruciale, avec le besoin d'adapter le récepteur au format de modulation, en particulier dans le cas de modulation de phase ou de fréquence, ainsi que de proposer en réception des systèmes de compensation dynamique de dispersion chromatique et de dispersion de polarisation.

La cryptographie par utilisation de propriétés physiques de la lumière est un domaine très prospectif qui a pour but la sécurisation des données transmises, mais qui pourrait avoir un impact indirect sur des domaines connexes. Elle demande par exemple des dispositifs d'émission à photons uniques. Les progrès dans les matériaux permettront d'accéder à des fonctions optiques logiques simples.

Situation existante (application, marché, acteurs)

Les composants sont représentés à travers plusieurs entreprises (Avanex, Nexans, Radiall, D-LightSys, Compagnie Deutsch, Ekinops, DA light com, Photline Tech, etc...), une liste plus exhaustive étant présentée par ailleurs. La cryptographie s'adresse aux marchés de la transmission sécurisée avec la start-up Smart Quantum et le suivi du domaine par plusieurs équipes industrielles.

Tendance, orientations futures

Une tendance forte dans le cadre des transmissions est de proposer à 40Gbit/s un dispositif d'émission/réception à bas coût et industrialisable, ce qui requiert une activité de R&D forte pour être prêt au bon moment. A cela s'ajoutent les activités pour identifier le format de modulation idéal, en terme de coût et performances. L'accès et les datacoms posent aussi des questions d'ingénierie et d'assemblage à soutenir à travers la recherche technologique dans les entreprises. Dans les dispositifs de cryptographie, il y a besoin d'augmenter l'efficacité du rendement quantique en gardant un dispositif compact et en contrôlant l'instant de production des photons.

Positionnement international

Si dans le domaine des composants et des sources, la recherche française n'est pas loin des leaders mondiaux et si l'on excepte les records de performances du leader industriel européen Alcatel, la recherche française dans les systèmes télécoms est peu compétitive sur le plan international.

En cryptographie quantique, la France a été précurseur et a une bonne reconnaissance dans la communauté, mais un retard se creuse par rapport à la Suisse et aux Etats-Unis.

Recommandations particulières

Le système de recherche actuel provient d'une distribution de cette thématique dans quelques rares laboratoires, rendant l'accès à la technologie très limité pour les autres laboratoires : ceci devrait être corrigé. Dans le domaine spécifique des systèmes télécoms, il existe une incompréhension partielle entre le milieu industriel et la recherche publique. Cette barrière doit disparaître.

3.2.2. Ligne, amplification, Connectique

Généralités

Les activités de R&D concernent la modélisation et la réalisation des fibres, en particulier pour les fibres de transmission, de dispersion chromatique et amplificatrices. Ces produits et ces technologies étant matures, les besoins d'innovation concernent essentiellement l'augmentation incrémentale de la qualité et des performances pour répondre à l'évolution des besoins des concepteurs de systèmes ou des opérateurs télécoms et aussi pour réduire le coût du produit. Les fibres à pompage par la gaine, et les pompes à forte puissance, font également part des recherches. Les activités amont sont à forte orientation matériau. D'autre part, la recherche sur l'amplification paramétrique dans les fibres reste d'actualité.

L'étude de la silice ou du verre co-dopé avec de l'erbium (ou autre terre rare), de la technologie des nanoparticules, et de nanograins de silicium ouvre de nouvelles voies pour des applications d'amplification. L'approche multicouche autorise le contrôle de la taille des nanograins de Si et permet aussi l'ajustement de la distance d'interaction entre l'ion Erbium et le nanograin Si.

Situation existante (application, marché, acteurs)

Les applications principales sont les transmissions optiques point à point sous-marine et terrestre ; les transmissions optiques métropolitaines et dans des réseaux optiques locaux. Les acteurs sont Highwave, Keopsys, ATI, Kylia, Avanex, Alcatel, Thales, ... pour la fibre, les amplificateurs, la connectique, les diodes de pompage.

Outre l'amplification, les applications visées par les nanograins concernent des composants compatibles avec le procédé CMOS : Guide amplificateur planaire à l'erbium ; Diode électroluminescente ; Sources photoniques ; Interconnexions optiques ; laser de pompage sous forme de couche de verre spécifique dopé à l'ytterbium pour télécommunications optiques.

Tendance, orientations futures

Au niveau des fibres optiques, La question principale est reliée à la maîtrise du verre et du guide en vue d'optimiser les propriétés de transmission, spectroscopie. Les fibres à très faible atténuation (0,01dB/km) pourraient redevenir un des sujets forts du domaine.

Pour les fibres dopées terre-rare, l'activité R&D pour applications à long terme concerne l'étude de l'élargissement de la bande d'amplification et de nouvelles bandes d'amplification, par la recherche sur les terres-rares et leur mélange. Le domaine reste novateur, en particulier dans le cadre des nanoparticules à l'erbium avec la maîtrise de l'homogénéité et de la concentration des ions, ainsi que dans le cadre de l'étude des matériaux co-dopés avec des nanoparticules de Si et de l'erbium ouvrant la porte de l'émission stimulée dans le Si. L'intégration de boîtes quantiques dans la silice, et ainsi l'adaptation à volonté les bandes d'amplification (par opposition aux ions) est aussi une piste innovante à long terme.

Pour l'amplification paramétrique, la recherche est orientée vers l'étude de l'amélioration des caractéristiques de gain et de bruit, en particulier à travers la conception de fibres particulières, par exemple à dispersion 'plate' sur une large gamme de longueur d'onde

Positionnement international

Pour la fibre de transmission, Alcatel est n° 1 en Europe et n°3 mondial. La recherche destinée au développement de ces produits est effectuée essentiellement en France. En ce qui concerne la fibre pour composant, la France est bien positionnée, avec des entreprises comme Alcatel ou Highwave. La concurrence est très rude en Europe, Japon ou aux Etats-Unis.

Il y a une bonne reconnaissance internationale sur l'amplification terre rare. Concernant les activités fibres terres-rares, les US poursuivent leurs travaux sur la bande S, pour peut-être s'orienter vers une matrice silice. Enfin, alors qu'il y a peu de laboratoires en France sur la thématique d'émetteurs à base de silicium nanostructuré, un fort savoir-faire existe en Italie, aux Pays-Bas, aux USA, Allemagne, GB, Japon, Corée du Sud... Mais les résultats français sont maintenant compétitifs et le savoir-faire mérite d'être consolidé grâce à l'apparition d'autres acteurs français.

Recommandations particulières

L'établissement de partenariats pluridisciplinaires (avec des labos composants, système, matériau, chimie, nanotechnologie, ...), y compris la participation à des réseaux thématiques et les contacts industriels est vivement souhaité.

La recherche technologique sur les fibres optiques télécoms a besoin du soutien des réseaux. Il faut que les appels à projets futurs couvrent ces sujets.

3.2.3. Fonctions non linéaires, Fonctions adaptatives

Généralités

L'étude des non-linéarités dans les fibres est un sujet large qui trouve ses applications pour l'amplification paramétrique, la génération de continuum, la conversion de fréquence, et l'effet de diffusion Raman pour la génération de longueur d'onde. La réalisation de fibre non cristalline à non-linéarité $\chi^{(2)}$ artificielle (polarisation artificielle par poling) est aussi étudiée. L'étude sur les composants absorbants saturables (structure à puits quantique InP à temps de recombinaison accéléré) à fonctionnement vertical (sans optique guidée) se penche sur leur utilisation pour la régénération de signaux à 10G et 40G ou pour le blocage de modes passifs dans des lasers pulsés.

L'un des vastes sujets très actifs concerne les micro- et nano-structures, comme la fibre à cristal photonique, la fibre à bande interdite et les guides d'onde LiNbO₃, qui amènent un nouveau degré de liberté dans la maîtrise des caractéristiques de propagations, linéaires et non linéaires.

Situation existante (application, marché, acteurs)

Les valorisations industrielles possibles sont les applications de niche, comme la conversion de longueur d'onde et la régénération optique, les applications d'adressage et de multiplexage spatial. Pour la fibre à cristal photonique et à bande interdite, le champ d'investigation est très large, et les applications envisageables aujourd'hui sont les filtres optiques, les fibres 'sans perte', et les fibres à effets non linéaires accentués. Les fibres à non-linéarité khi2 devraient permettre d'exploiter les effets paramétriques, en particulier la génération d'harmonique, la transposition de longueur d'onde, et la réalisation de filtres optiques accordables.

La thématique consacrée à la commutation spatiale est aujourd'hui exploratoire, en attente d'un milieu de propagation qui donnera des puissances compatibles avec le domaine des télécommunications.

Mais le plus large panel d'applications se trouve dans les lasers, capteurs, fibres creuses pour compression d'impulsions très énergétiques, l'usinage et marquage, la télémétrie, et les applications en optique bio-médicale et en métrologie (tomographie de cohérence, microscopie confocale en lumière blanche).

Tendance, orientations futures

Il reste bien entendu une problématique scientifique, comme l'influence de la cohérence dans le processus non linéaire qu'il soit destiné à l'amplification, la génération de continuum ou la réalisation de guides auto-induits. De même, la compréhension de la fibre photonique semble bien maîtrisée, sauf au niveau de la biréfringence.

Cependant, la plupart des questions à résoudre pour poursuivre les avancées sont d'ordre technologique. En particulier, au niveau de la fibre photonique, l'atténuation doit être améliorée ; probablement en maîtrisant les questions d'interfaces, les processus multi-étapes de réalisation, le remplissage des trous par un gaz, l'isolation des trous de l'air ambiant, le couplage de la lumière dans ces fibres.

En dehors de ce domaine, les grandes questions restent le choix des matériaux pour répondre au compromis rapidité/énergie, la réalisation de ces objets, et le suivi des différentes solutions potentielles. Parmi de grands axes futurs, aptes à résoudre les difficultés scientifiques actuelles, on peut citer l'étude d'un système optique adressable et reconfigurable, l'ensemble de l'optique non linéaire dans les microstructures, le dopage de barreaux insérés dans la fibre, l'étude des matériaux, tels les chalcogénures et les polymères de forts coefficients non linéaires, les absorbants saturables pour la réalisation de régénérateurs 2R tout-optiques. Les composants à semi-conducteur étudiés pourront entrer dans la réalisation de commutateurs reconfigurables ultrarapides ou de dispositifs de compensation dynamique de dispersion chromatique.

Positionnement international

L'étude des effets non linéaires dans les fibres est bien couverte en France et la reconnaissance est forte sur ce sujet. Il y a une très forte compétence en modélisation (propagation linéaire ainsi que couplage avec non-linéarité) et la force de la France est de compter toutes les compétences requises. Dans l'étude des solitons spatiaux, l'on trouve des travaux complémentaires selon le matériau : matériau khi2 à Limoges, khi3 et photoréfractif à Besançon, photoréfractif à Metz, et cristaux liquides à Valenciennes.

En ce qui concerne les semi-conducteurs micro-structurés, la France est bien placée en fabrication, aux côtés de l'Ecosse, des Pays-Bas ou de la Suède ; et elle est correctement placée dans le domaine de la gravure profonde, où des progrès restent encore nécessaires. En ce qui concerne la modélisation, la France suit des leaders comme le MIT ou Stanford. Dans le domaine des applications d'optique linéaire et non-linéaire, son expertise est compétitive et joue parfois un rôle leader, en particulier pour les applications liées aux absorbants saturables.

En ce qui concerne la fibre photonique, la concurrence est forte, en particulier en Europe avec ORC, Université de Bath, et Blaze Photonics (UK), COM et Crystal Fibre (DK), Liekki. Au Japon, l'on trouve Sumitomo. L'Angleterre (via ORC et ses premiers travaux en 1995) a de

l'avance, mais ces travaux ne résolvent pas souvent les questions de base et technologique, et laisse la voie ouverte à l'innovation. Un retard existe au niveau technologique, avec des moyens humains et financiers beaucoup plus importants outre-Manche ainsi qu'au Danemark. Au niveau de la commutation rapide, il s'agit également d'un point fort en France du point de vue fondamental (avec Besançon, Dijon, Limoges, LPN, ...) et les labos très actifs se trouvent en Allemagne, Angleterre, USA, Canada, Australie et au Japon.

Recommandations particulières

Le principal besoin est de disposer en France d'une centrale technologique nationale forte, permettant la fabrication des préformes, des préformes dopées et leur fibrage. Il existe une plate-forme CNRS (IRCOM-LPMC), une plate-forme IRCICA, une ONERA et des plates-formes industrielles (Alcatel, Highwave) dont une bientôt dans une structure associative ouverte (PERFOS).

Les recommandations particulières sont donc :

- ⌘ *Il faut une vision nationale, c'est-à-dire des plates-formes articulées entre elles, avec des industriels pouvant s'exprimer sur les choix, les objectifs et les programmes de recherche,*
- ⌘ *Il faut rendre ces plates-formes aisément accessibles aux laboratoires et performantes avec plus de personnel hautement spécialisé et en évitant la dispersion des moyens sur le plan technologique.*

Pour le domaine de la commutation rapide, il y a besoin de faire se rencontrer les trois communautés spécialistes : celle des semi-conducteurs, celle des télécommunications et celle de la propagation non linéaire. Il est en effet impossible de suivre seul les progrès de chacune des communautés. Le cloisonnement actuel est trop fort et l'organisation de rencontres pourrait relancer la motivation.

3.2.4. Ingénierie de la transmission et du réseau

Généralités

Les domaines principaux sont l'ingénierie des réseaux de transport et d'accès, et l'identification du rôle optimum (économique) de l'optique pour permettre d'offrir les nouveaux services (en particulier téléphonie, vidéo et internet).

Situation existante (application, marché, acteurs)

Dans le réseau optique d'accès, il s'agit d'offrir à l'abonné un accès à haut débit (de quelques 10 Mbit/s à 1 Gbit/s), les deux motivations principales de ce débit très élevé étant les images animées et l'utilisation des écrans plats de large surface; avec à terme les applications vidéo 3D.

Aussi bien pour l'accès que le transport, les entreprises concernées sont les opérateurs et les industriels commercialisant des systèmes, dispositifs et composants.

Tendance, orientations futures

Dans l'accès, la R&D doit absolument se focaliser sur la réduction drastique des coûts des composants et dispositifs destinés au terminal, en exploitant des techniques de production de masse ; ce point est crucial pour l'utilisation de l'optique au plus près de l'utilisateur. Les travaux portent aussi sur la modulation et les sources (par ex. à spectre large pour accès). Le passage à la technologie optique sera nécessaire, avec la question de la définition de l'intelligence du réseau réservée au domaine de l'optique et de l'électronique. Une règle générale pourrait être de placer un maximum de fonctions 'réseaux' dans la technologie du transport.

Dans le réseau de cœur, les axes de recherches à mener sont autour de la capacité maximale des fibres, l'étude des liaisons à 40Gbit/s, et des fonctions adaptatives indispensables. Là aussi, toute technique permettant de réduire les coûts doit être étudiée. Les travaux sur la transmission optique au débit de 160 Gigabit/s par canal doivent être maintenus, déclencheurs

d'activités de recherches sur les composants, fibres, etc... Au-delà de la fibre optique et de la filière WDM, les fibres à très faible atténuation (0,01dB/km), considérée dans les années 80 comme une rupture possible, pourraient redevenir un des sujets forts du domaine, avec à la clé, en cas de succès, un bouleversement en matière d'architecture de réseaux de transport.

Positionnement international

Le contexte actuel nous fait assister à un réel retournement de situation, et les technologies du domaine ne sont plus un point fort en France ni en Europe. Les grands composants n'ont plus les supports massifs apportés par les programmes nationaux, et par les industriels. La France comporte des laboratoires de haut niveau se penchant sur les questions 'fondamentales', mais les activités de l'industrie et des opérateurs se sont fortement réduites. Certains opérateurs internationaux ont une activité forte de déploiement de l'optique dans le réseau d'accès : le Japon, Corée, Italie, Suède, les USA. Le Japon reste le seul pays à maintenir une réelle recherche d'envergure sur les composants optiques.

Recommandations particulières

La position de la France et de l'Europe dans le domaine, forte il y a peu, est affaiblie aujourd'hui par le contexte économique : il faut absolument maintenir l'expertise existante, poursuivre la R&D de ce domaine, et préparer le rebond futur.

Il n'y a plus de laboratoires réalisant le lien entre la recherche amont et l'industrie, suite à la disparition de FT-CNET et à la forte réduction de la recherche industrielle. Ce vide doit être comblé par des laboratoires de recherches appliquées, avec une coordination forte et les budgets de fonctionnement nécessaires, ce qui leur permettra de jouer ce rôle de lien.

3.2.5. Interconnexion, distribution d'horloge

Généralités

L'introduction d'optique dans les microprocesseurs CMOS est envisagée en remplacement des connexions métalliques de plus longues distances. À mesure que la vitesse des circuits intégrés augmente, elles présentent en effet des inconvénients tels que la consommation électrique, la désynchronisation de différentes zones de la puce ou la sensibilité aux parasites électromagnétiques. La distribution d'horloge ou l'interconnexion intrapuce optique requiert le développement de sources, guides, fonctions passives et détecteurs qui soient entièrement compatibles avec les circuits CMOS. Le substrat SOI permet de développer ces briques élémentaires, excepté la source qui ne peut pas encore être intégrée.

Situation existante (application, marché, acteurs)

Les applications concernent les microprocesseurs rapides. Les feuilles de route classiques prévoient l'introduction de fonctions optiques pour la distribution d'horloge pour des fréquences de 10 GHz environ, qui sera atteinte avant 2007 (loi de Moore). Les marchés concernés sont ceux de l'informatique et tous les grands acteurs industriels des microprocesseurs sont impliqués : ST Microelectronics, Intel, IBM, Samsung... Ces entreprises développent déjà des circuits sur SOI avec germanium et sont très intéressées.

Tendance, orientations futures

Les défis technologiques sont forts dans la microphotonique : il s'agit de réaliser des gravures submicroniques de très faible rugosité pour les guides, des épitaxies localisées en filière SiGe/Si ou Ge pour le photodétecteur ou le modulateur... La fabrication d'émetteurs en filière CMOS est également prometteuse. Enfin la maîtrise des dispositifs à cristaux photoniques devrait ouvrir de belles perspectives.

Une fois la distribution d'horloge réalisée, des interconnexions entre blocs pourront être envisagées et à plus long terme, des liens optiques en WDM pour le datacom intrapuce, ouvrant la voie des « systèmes-sur-puce ».

Positionnement international

La recherche française est bien positionnée malgré des budgets bien moins importants qu'au Japon ou aux États-Unis.

Recommandations particulières

La présence d'équipements performants en micro- et nanotechnologie pour des démonstrations de faisabilité avec des temps de cycle court, est primordiale. Les investissements nécessaires ne permettent probablement pas de disperser les efforts ; les solutions doivent être trouvées afin de permettre un accès rapide et souple aux équipements. Il faut également avoir un personnel permanent suffisant pour utiliser et entretenir ce matériel.

3.2.6. Stockage optique, l'optique dans l'ordinateur

Généralités

Le stockage sur disque optique est l'un des grands succès de l'optique. Ce succès tient au fait qu'il n'y a pas de contact tête-support, et que la copie s'effectue à bas coût par simple pressage et polymérisation. Le succès ne vient pas de la densité de stockage, dont les performances disponibles aujourd'hui sont dépassées par le stockage magnétique.

Dans le domaine de l'ordinateur optique, après la question d'un éventuel traitement tout optique de l'information, voire d'ordinateurs optiques, la technologie du silicium incite plutôt à parler du rôle de l'optique dans l'informatique ou opto-informatique.

Situation existante (application, marché, acteurs)

Le stockage de très forte densité concerne les applications de stockage vidéo, par exemple sans codage et sans perte d'information. Il faut citer Thomson, pour les applications vidéo et informatiques. MPO est reconnu pour la réalisation et reproduction des disques.

Tendance, orientations futures

Les activités principales dans le domaine du stockage visent à augmenter le couple capacité-débit. Parmi les solutions, notons : le laser bleu vers 405nm, pour le gain en capacité, le laser UV, mais qui demandera aussi de résoudre les questions de la transparence du matériau support et de la détection ; et le disque à plusieurs couches. La facilité de réaliser des copies en grande quantité, bas-coût et rapidement est aussi un point important.

Une orientation future est le stockage 3D, via les techniques d'holographie, avec une reprise des travaux aux US, au Japon, et en France sur les matériaux pour le stockage. Le stockage 2D à l'échelle du nanomètre par technique du champ proche fait partie également des pistes novatrices. Ces domaines présentent un grand potentiel d'innovation. Sony, Pioneer, ... y travaillent pour les applications grand public et professionnelles.

Dans le domaine de l'optique dans l'ordinateur, quelques recherches 'amont' se dégagent:

- les traitements très rapides, modérément parallèles peuvent être indispensables pour la commutation dans les télécommunications et des solutions tout optiques sont activement recherchées. Il y a là un enjeu important où les laboratoires français sont en bonne place.
- Dans le domaine du traitement analogique, la technologie actuelle des modulateurs optiques permet d'innover en matière d'imagerie (par exemple pour des données tri-dimensionnelles ou polarimétriques) et d'y associer des prétraitements optiques. Des collaborations se montent entre laboratoires français sur ces questions, qui relèvent davantage de l'acquisition que du traitement.

Positionnement international

La France n'est plus aujourd'hui dans une position de force, sans aucun acteur industriel système. En Europe, notons Philips Hollande et l'Allemagne (qui fait preuve d'un fort soutien), grâce à la maîtrise de l'assemblage de la micro-optique. Le Japon, Taiwan et la Corée sont fortement impliqués. En France, il y a quelques fournisseurs amont de matériaux

pour lasers bleus, comme Lumilog, Thales, Crismatec, Novalux, NovaSic, Nanovation... Le LETI semble reprendre cette thématique, comme phase d'expansion de sa plate-forme. La recherche publique est de rang mondial sur les semi-conducteurs à grand gap et les lasers à puce compacts. Il existe aussi une expertise, plus exploratoire, sur les matériaux pour le stockage (LPQM Cachan, Polytechnique, ESPCI, Dijon), mais sans démonstration de dispositifs.

Recommandations particulières

Il existe une application qui n'a pas trouvé de solution : la mémoire purement optique de type 'RAM' à accès aléatoire, et le registre à décalage. Il serait souhaitable qu'une étude soit menée sur le sujet en examinant les limites fondamentales de l'optique et de la photonique, et en proposant les solutions et innovations nécessaires à mettre en œuvre. Cela pourrait aussi permettre de reconsidérer l'avenir des 'paquets optiques' dans les réseaux.

3.2.7. Optique et micro-ondes

Généralités

L'optique dans le domaine des micro-ondes concerne les liaisons optiques hyper-fréquences point à point dans la gamme 1-60GHz (sans interférence électromagnétique), et la commande optique d'antenne à balayage en mode émission et réception (par contrôle fin de la phase et des retards). Aujourd'hui, ces liaisons n'ont pas toujours les qualités des liaisons RF classiques entre antenne radar et unité de traitement, mais les technologies opto-hypers seront incontournables pour les applications radar futures, à la fois des points de vue architectures et composants.

Situation existante (application, marché, acteurs)

Le domaine de l'optique micro-onde donne lieu à des maquettes de démonstrations en labo: commande optique antenne, liaisons hyper sur porteuse optique. Ces dernières seront intégrées dans certains types d'équipements radars. Les fonctions de traitement seront exploitées dans des architectures hybrides optique/électronique mais sont considérées encore comme des études de base. On peut aussi penser aux comm RF à haut débit en espace libre.

Les applications principales au sein de Thales sont le domaine de la Défense: radars de surveillance, radars embarqués, antennes pour le spatial TH est certainement la seule entreprise maîtrisant à la fois la technologie des composants spécifiques à ces applications ainsi que les architectures de systèmes.

Tendance, orientations futures

Les besoins de composants spécifiques sont différents du domaine des télécommunications civiles, par une plus grande stabilité de fréquence et de pureté spectrale de modes longitudinaux.

Pour atteindre les critères de qualités des radaristes, des solutions sont envisagées, comme la suppression de porteuse optique, les photo-détecteurs hyperfréquences à très forte puissance de saturation, la modulation BLU (bande latérale unique) ... A plus long terme, les techniques de réduction du bruit, les nouveaux composants optoélectroniques 'Quantum dots', les polymères pour modulateurs à très faible tension de contrôle, les mécanismes d'amplification optique à très bas niveau de bruit, les micro cavités, des architectures de traitement de signal opto – hyper devraient être investiguées.

Parmi les orientations et applications futures de l'optique et micro-onde, notons l'interconnexion optique entre composants électroniques, la technique du Lidar-Radar, la génération de fréquences Terahertz.

Positionnement international

En France, les acteurs académiques pour les composants hyper sont l'IEMN de Lille, INPG Grenoble, Université de Chambéry. Thales est l'industriel manant les activités de recherche et

développement de démonstrateurs avec maîtrise de la technologie des composants de base. Les USA sont présents avec Hughes, Raytheon, NRL, U de Santa Barbara. Plusieurs labos US sont actifs dans le nouveau domaine de rayonnement Terahertz.

Recommandations particulières

Une synergie pourrait être trouvée à travers une plate-forme technologique semi-conducteur de base commune aux applications télécoms et micro-onde, avec des activités sur l'optoélectronique, l'optronique et l'électronique (III/V, GaAs et les nitrures). L'optronique vise généralement des sources laser SC émettant dans des domaines de longueur d'onde plus variés tels que proche IR ou IR lointain (12 microns) voire jusqu'au Terahertz. (Lasers à cascade quantique)

3.3. Recommandations générales

Structuration

Il est nécessaire de réduire le morcellement des organismes publics et privés et de les inciter à mieux mutualiser certaines recherches. Une forte coordination nationale de la recherche serait souhaitable comme par exemple sur les fibres optiques, avec des objectifs scientifiques, techniques et applicatifs clairs ; le modèle des GRECO pourrait former une base de départ.

Il y a danger de multiplication de plates-formes, et il faut, pour toute plate-forme, une mise en cohérence nationale des objectifs et moyens, en particulier à travers des relations bipartites public-privé, et donc un outil de réelle gestion des laboratoires appliqués.

La possibilité d'établir des partenariats pluridisciplinaires (avec des laboratoires composants, systèmes, et les laboratoires centrés sur d'autres expertises telles la sciences des matériaux, ...) doit être facilitée, y compris par la participation à des réseaux thématiques pluridisciplinaires et par les contacts industriels.

Il apparaît également qu'une réflexion sur l'identification des applications offertes par les technologies (par exemple les structures photoniques) est nécessaire. Il faut donc prôner une 'Dynamique des sujets de recherches', et se donner les outils, humains et financiers, pour être capables de ré-orienter une activité en fonction des résultats et des applications identifiées. De même, il faudrait une véritable interface « recherche - monde socio-économique » capable de mener une prospective efficace des potentialités d'applications des recherches.

Favoriser la valorisation

Du point de vue général de la recherche publique, il y a une grande disparité entre la façon dont sont perçues les activités fondamentales et les applications. Les personnes intéressées par la valorisation industrielle voient leurs actions peu reconnues dès lors qu'elles ne débouchent pas sur publication. D'autres critères motivants d'évaluation doivent être proposés.

Les pôles régionaux ont un rôle à jouer dans cette mise en place de laboratoires de recherche appliquée, rapprochant la recherche amont et les applications industrielles.

Enfin, il faut éviter les blocages dans les partenariats en trouvant des modalités de partage équitable et simple de la propriété industrielle, qui entravent souvent l'établissement de collaborations. Il faudra aussi tirer profit des collaborations public/privé, avec des laboratoires publics qui doivent progresser dans la valorisation de leurs résultats.

Financement

Un accès simultané et complémentaire aux financements de type ACI (sujets amont, risqués) et de type 'applications' (obligation de démonstration, limité dans le temps) est souhaitable. Une articulation entre ces deux types de financement pourrait être bénéfique et complémentaire. Les appels d'offres à de tels projets d'interface académique-industriel pourront donner, outre les objectifs applicatifs, des orientations scientifiques claires et ciblées, comme cela se passe dans d'autres pays.

Les ACI et les projets réseau technologiques sont intéressants mais gagneraient à prendre en compte le caractère pluridisciplinaire de cette recherche : langage à trouver pour une évaluation facilitée; ne pas pénaliser des projets qui ont d'autres sources de financement. Il faut améliorer la réactivité vis-à-vis des sujets de recherches émergents. Par exemple, il faudrait des moyens de soutien rapide pour explorer des voies nouvelles et même risquées. Il faudrait permettre aux projets un accès aux sources régionales de financement même quand un des partenaires est dans une autre région, grâce par exemple à une entente entre régions. (Même remarque pour les autres collectivités locales). Enfin, les PME ont besoin d'accéder à un soutien présentant les caractéristiques suivantes : rapidité de mise en œuvre, contact facile avec les interlocuteurs, critères d'appréciation pertinents. Le soutien de l'Anvar peut par exemple adhérer à ces critères. Les projets RNRT ont également un effet favorable, même si le démarrage est un peu long. Par contre, les projets européens paraissent inadaptés car trop lourds.

Technologie

Il faut disposer en France de centrales technologiques nationales fortes, selon les technologies étudiées. Il existe des plates-formes CNRS, plate-forme d'échange technologique système, des outils de caractérisation, des plates-formes industrielles, parfois dans une structure associative ouverte. Tous ces outils ont pour mission de servir la recherche amont et technologique, et doivent être accessibles aux autres laboratoires publics et privés, rapidement et de façon souple et performante. Au risque de se répéter, la mutualisation, la mise à disposition et la coordination des plates-formes, en particulier celles qui nécessitent des investissements trop lourds pour être dupliquées, sont un critère de succès, et cette mise en commun des efforts doit se dérouler dans le cadre d'une vision nationale.

Recrutement

La possibilité d'ouvrir des postes de thèse et des contrats CDD existe, par exemple à travers les fonds CIFRE et les réseaux nationaux. Cette voie doit être maintenue/renforcée, afin de pouvoir de façon souple et efficace lancer de nouveaux sujets. Il y a besoin de revaloriser les bourses de thèse et de clarifier leur mode d'attribution. Le recrutement des thésards est aussi difficile, avec le nombre total de bourses et leur montant insuffisants.

La venue de chercheurs étrangers reconnus peut stimuler les équipes jeunes et générer de nouveaux axes de recherche ; il sera nécessaire par exemple de proposer des conditions financières attractives. Le recrutement de post-doctorants est très difficile en raison des temps de cycle nécessaires pour obtenir des bourses, surtout en présence d'une concurrence internationale forte. Un système plus réactif d'attribution des bourses serait donc bénéfique.

Formation

Il faut éviter que ces Ecoles/Universités ne ré-orientent trop rapidement leurs programmes en suivant les fluctuations du marché. Il en résulterait une diminution du nombre d'experts qui ne permettrait pas de repartir rapidement lorsque l'industrie des télécoms l'exigera. La meilleure solution est de maintenir, voire renforcer, l'enseignement des disciplines de base que sont l'optique, la micro-électronique, le logiciel et le traitement de signal.

L'enseignement de l'optique générale tend à se réduire dans de nombreuses filières universitaires où cette discipline apparaissait comme complémentaire. Cette compétence se réduit en se focalisant désormais sur les seules formations spécialisées (ESO par exemple). Ceci est à éviter à un moment où le domaine d'application de l'optique se diversifie encore plus.

Le manque de formation à la technologie, aux salles blanches et aux systèmes de télécommunications numériques et analogiques, pourrait être comblé en introduisant des options sur la technologie, en incitant des stages en entreprise ou sur les plates-formes. Il manque au niveau des ingénieurs une formation qui soit à la charnière entre l'optique et la micromécanique. De même, un couplage de l'optique et des nanotechnologies serait

profitable, pas seulement au niveau doctoral mais aussi au niveau du mastère (options de DEA par exemple)

Chapitre 4

SANTE ET SCIENCES DE LA VIE

La présence de l'optique en Biologie et en Médecine ne doit constituer une surprise pour personne. Nous sommes, en effet, habitués à voir des images de Pasteur à sa table de travail près d'un microscope et cet outil occupe toujours une place de choix dans les laboratoires de biologie. Nous connaissons également les bienfaits de l'irradiation solaire sur les rachitiques ou l'usage de l'ultraviolet pour la désinfection et plus récemment les traitements de cancers basés sur la thérapie photodynamique. Enfin le laser est entré à l'hôpital depuis le milieu des années 60 pour soigner les décollements de rétines, couper et coaguler à la fois et, plus récemment, pour la correction des aberrations de l'œil par retouche de la cornée.

Malgré cette connaissance que nous pouvons avoir du sujet avec maints exemples voisins de ceux que nous venons de citer nous sommes surpris par la très brusque accélération des applications biomédicales de l'optique telles que l'on peut les percevoir à travers les congrès internationaux, les programmes de recherche (surtout américains), et peut-être à un moindre niveau, l'impact industriel des recherches de ces dix dernières années.

Dans le domaine de la santé et des sciences de la vie l'optique a ainsi depuis longtemps des domaines d'applications traditionnels :

- la lunetterie
- l'endoscopie,
- l'éclairage des blocs opératoires
- la microscopie classique
- l'imagerie par rayons X
-

Le secteur où l'optique a une forte influence sur l'amélioration de la santé de l'homme est le secteur de **l'ophtalmologie** avec les apports des corrections dues aux lunettes de plus en plus performantes, aux verres de contacts, et aux appareils spécifiques pour les mal voyants. Sur ce secteur la présence industrielle française est forte avec ESSILOR leader mondial pour les verres minéraux, BBGR, Bourgeois et un réseau de PME. Un grand nombre d'entreprises (PME en général) fabriquent des montures métalliques ou plastiques de lunette. Le territoire dispose d'un réseau complet de vente de lunette et matériels annexes et de cycles d'enseignement tels les BTS opticien lunetier .

Comme on l'a souligné au chapitre 2 le marché total est de 3.11 milliards d'euros en croissance de 3.7% entre 2001 et 2002. Cette croissance est en partie tirée de la plus grande pénétration des produits à forte valeur ajoutée : verres progressifs, organiques, haut indice (1.74), photochromiques, traités anti-reflet. La répartition du marché en valeur est la suivante

Verres de lunettes 59.8 %

Montures 23.5 %
Lentilles de contact 7 %
Produits d'entretien 2.7 %
Lunettes de soleil 7 %

En 2002, 21.6 millions de verre ont été vendus en France.

Les problèmes liés à la production des verres en verres traditionnels ou en verre organiques sont traités dans le chapitre 7 consacré aux procédés de fabrication.

En France peu d'entreprises et de laboratoires travaillent sur l'endoscopie.

Depuis quelques années d'autres domaines sont apparus avec les progrès des recherches et de la technologie ouvrant de nouveaux champs d'investigations et de nouveaux moyens d'études. La **biophotonique** est un thème en émergence et la France accuse un retard par rapport à ses voisins allemands et anglais et par rapport aux USA et au Canada. C'est aussi un thème multipartenaire nécessitant opticiens, chimistes, biologistes et médecins.

Certains des sujets ont été revisités et ont trouvé de nouveaux champs d'application, citons la tomographie optique cohérente (Optical Coherence Tomography ou OCT) qui est simplement basée sur l'interférométrie et constitue aujourd'hui un outil nouveau et reconnu pour l'exploration de la rétine.

D'autres thèmes sont liés au développement de concepts nouveaux et/ou à la mise sur de marché d'outils performants, dans ce cadre nous pouvons mentionner la microscopie non-linéaire qui semble adoptée par un très grand nombre de laboratoires pour l'imagerie fonctionnelle et la tomographie optique pour le diagnostic des tumeurs du sein ou pour suivre l'activité cérébrale.

Considérer l'optique biomédicale comme une discipline spécifique dans le cadre d'un document consacré à l'optique en général n'est peut-être pas simple car nous allons y retrouver l'optique que nous connaissons taillée pour des applications ou des défis qui appartiennent à d'autres disciplines

Néanmoins nous ne pouvons éviter de nous poser quelques questions et de tenter de susciter une réflexion :

- Quel est aujourd'hui le cadre de ce domaine ?
- Comment se placent au niveau international la recherche et l'activité industrielle menées en France ?
- Faut-il penser à des formations spécifiques ?
- Faut-il développer des réseaux de compétences ?
-

Le plan que nous suivrons pour cette présentation sera le suivant :

L'optique et l'image : de la cellule à l'organe.

L'optique et le diagnostic : des biopuces aux nouvelles sondes.

L'optique et le traitement : le laser et ses interactions avec les tissus.

§ Un document sur la **Biophotonique** réalisé par OPTICSVALLEY et GENOPOLE en juin 2003 contient un état des lieux détaillé du domaine en France et de nombreuses références aux activités menées à l'étranger. (voir page 12)

4.1 L'optique et l'image : de la cellule à l'organe.

4.1.1. Les nouvelles microscopies.

Par son pouvoir de résolution (de l'ordre de la fraction de micromètre) le microscope optique se prête bien aux études de biologie cellulaire. Cependant on demande toujours plus de performances à des systèmes parfois très complexes dont le microscope est l'élément central : rapidité, bon rapport signal sur bruit, analyse spatiale 3-D souvent complétée par une information spectrale, temporelle et/ou de polarisation. De la cellule on passe au tissu, du morphologique on évolue vers le fonctionnel, enfin les nouveaux lasers très brefs (~100 fs) nous font dépasser le stade de la réponse linéaire pour tirer profit d'effets non linéaires spectaculaires mais utilisés aujourd'hui de façon quasi routinière.

a) Microscopie confocale : fluorescence et diffusion Raman

La microscopie confocale permet d'obtenir par filtrage spatial et par balayage du champ de l'objet, des « coupes » virtuelles d'un objet 3-D. Cette méthode est solidement implantée dans les laboratoires de biologie depuis une vingtaine d'années.

Au fil des ans, des objectifs d'excellente qualité, de très grande ouverture numérique (supérieure à 1,5) permettant des résolutions de l'ordre de 200 nm dans les 3 dimensions ont été introduits sur le marché.

C'est au niveau de la détection, du traitement du signal et des images, et enfin de la vitesse que de réels progrès techniques ont été introduits dans les montages. Citons les nouveaux photomultiplicateurs, les chaînes de comptage ou les corrélateurs de photons, les systèmes de balayage à base de miroirs galvanométriques rapides ou de déflecteurs acousto-optiques.

La fluorescence est le mode de détection dominant en biologie, des marqueurs spécifiques pouvant être facilement associés à des sondes fonctionnalisées.

Cependant le spectre Raman est très porteur d'informations « moléculaires » en révélant les fréquences propres des modes de vibration des édifices moléculaires. L'analyse fine du spectre de la lumière diffusée (diffusion « inélastique ») à travers un monochromateur double ou triple rend la prise d'image plus lente. De ce fait le filtre spatial n'est pas ici un trou mais une fente couplée au monochromateur et la détection se fait simultanément spatialement (1-D) et spectralement sur un détecteur de type CCD refroidi.

Enfin nous devons souligner l'effort qui est fait pour miniaturiser la détection confocale. Une très belle réalisation instrumentale, qui consiste à introduire un faisceau de fibres dans un endoscope, est proposée par une jeune société française. Des projets tirant profit des MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) laissent entrevoir une production de systèmes compacts et rapides dont le « design » nous éloigne de celui de la microscopie traditionnelle.

b) Microscopie multi dimensionnelle

Nous avons présenté, avec la microscopie confocale, un outil permettant d'explorer les trois dimensions de l'espace ainsi que des paramètres spectroscopiques. D'autres paramètres sont accessibles, comme le temps de vie, qui peut lui même être sensible à de nombreux facteurs affectant l'environnement de la molécule fluorescente.

Les molécules (ou autres nano objets fluorescents) sont rarement isotropes (c'est à dire de symétrie cubique ou tétraédrique). Excités par de la lumière polarisée elles émettent une lumière dont le taux de polarisation est réduit par l'éventuelle réorientation de la molécule émettrice pendant une durée qui est le temps de vie de fluorescence.

D'autres effets de polarisation se manifestent lorsque les structures étudiées sont anisotropes (collagène par exemple). Comprendre les signaux obtenus en 3-D avec les ouvertures numériques importantes des microscopes est un objectif ambitieux qui est en cours de développement.

c) Microscopie non linéaire

Les lasers ultrabrefs et accordables dont le représentant le plus connu est le laser Ti^{3+}/Al_2O_3 (dit Titane Saphir) produisent au foyer d'un objectif de microscope une densité de puissance considérable (de l'ordre du TW/cm^2) avec des puissances moyennes de quelques dizaines de mW.

A ce niveau d'irradiation l'approximation linéaire de l'interaction lumière-matière n'est plus suffisante et il faut mettre en jeu des termes d'ordre supérieur. Parmi les approches qui ont émergé ces cinq ou dix dernières années la « fluorescence multiphotonique » compte un nombre très rapidement croissant d'utilisateurs.

La fluorescence à deux photons reste la technique la plus répandue : si la densité de photons par unité de volume et de temps est suffisante deux photons (du domaine proche infrarouge par exemple), se couplent pour induire une transition (absorption) vers un état excité dont l'énergie correspond à la somme des énergies de chacun des deux photons (état qui pourrait être atteint par un photon UV par exemple). Après absorption les processus de relaxation et d'émission sont les mêmes que ceux de la fluorescence à un photon.

Si nous avons choisi de décrire cette approche qui, il y a quelques années encore, était considéré comme « exotique » c'est qu'elle présente des avantages essentiels : le fait que la fluorescence ne soit induite que dans la seule zone focale limite le blanchiment aux molécules « utiles », de plus l'utilisation de photons infra-rouges, moins diffusés par les tissus que ceux du domaine visible ou UV, permet une pénétration meilleure de la lumière dans les tissus (près d'un mm dans les cerveaux de jeunes rats).

d) Observation de molécules ou de nano objets uniques

La très grande sensibilité de la détection optique permet l'observation de la fluorescence de molécules individuelles ou d'un petit ensemble de molécules localisées dans un volume de l'ordre du μm^3 . Ces sondes locales sont révélatrices d'interactions révélant l'environnement physico-chimique ou biologique (lorsque les molécules sont fonctionnalisées par exemple). Très largement utilisées, en neurophysiologie par exemple, ces sondes peuvent être suivies en temps réels pour marquer des effets géométriques (repliement d'une protéine) ou fonctionnels (réactions photosynthétiques).

Au niveau de la génomique ou de l'analyse immunologique ces outils seront de plus en plus précieux. Mentionnons que d'autres nano-objets individuels sont aujourd'hui disponibles : les Quantum Dots qui sont plus « robustes » dans leur interaction avec la lumière.

Enfin récemment l'absorption de nano particules métalliques a servi de base à une approche « photothermique » de l'imagerie d'objets de marqueurs nanométriques.

e) Microscopie de Champ Proche

S'il est possible de détecter le signal émis ou absorbé par un objet unique dont la taille est de l'ordre du nanomètre et de le localiser avec une précision du même ordre, la diffraction reste une limite à la résolution optique : il n'est, en effet, pas possible de séparer deux objets séparés de moins que $\lambda/2$ ou λ est la longueur d'onde de la lumière dans le milieu observé.

Quelques expériences (souvent délicates !) ont prouvé que l'on pouvait gagner des facteurs de l'ordre de quelques unités en faisant par exemple interférer les champs émis à travers deux ou plus objectifs différents (4 pi microscope).

L'optique de champ proche vise à détecter au voisinage immédiat des structures étudiées les champs évanescents porteurs de l'information liées aux hautes fréquences spatiales contenues dans l'objet (ou ce qui est équivalent aux détails dont la taille est $\lambda < \lambda/2$).

Dans la mouvance de l'AFM (Atomic Force Microscope) ou du STM (Scanning Tunneling Microscope) le SNOM (Scanning Near Field Optical Microscope) est une méthode de balayage utilisant une sonde locale capable d'isoler un élément de surface de l'échantillon de taille $\ll \lambda^2$.

Deux approches sont utilisées aujourd'hui :

- Une fibre optique effilée et métallisée avec une ouverture de quelques dizaines de nm joue le rôle de nano source (lorsqu'elle conduit la lumière vers un détecteur). La résolution typique des montages commerciaux est de l'ordre de 50 nm soit $\lambda/10$.
- Une pointe métallique effilée joue le rôle d'une « nano-antenne » et diffuse (« frustre ») localement le champ évanescent pour le transformer en champ propagatif. La résolution est ici d'une dizaine de nm.

Les deux approches sont largement utilisées (objets uniques en régimes linéaires ou non linéaire par exemple) par des groupes importants surtout à l'étranger. Bien que ce domaine soit bien implanté en France la jonction Physiciens à Biologistes ne s'est pas encore faite sur ces thématiques à de rares exceptions près. Pourtant les enjeux sont importants en génomique par exemple il faudra à moyen terme localiser des sondes fluorescentes séparées par quelques paires de base.

f) Tomographie et Microscopie de Cohérence

Il s'agit d'une méthode d'imagerie basée sur l'interférométrie avec une source à faible longueur de cohérence L_c : à partir d'une séparatrice une part de l'illumination est dirigée sur une voie de référence une autre sur l'objet examiné. Seule la « tranche » d'objet dont l'épaisseur est inférieure à L_c et distante de la séparatrice d'un chemin optique égal à celui du bras de référence donnera un signal d'interférence.

Cette méthode introduite au début des années 90 a très vite débouché sur un instrument opérationnel présent à l'hôpital dès 1995. L'application principale est l'ophtalmologie avec l'examen rétinien. Il est, en effet possible d'explorer la rétine, de mesurer son épaisseur (contrôle pour diabète et glaucome), de voir les dégénérescences maculaires et des décollements de rétine à un stade précoce.

Les tendances actuelles visent à augmenter la résolution dans les 3 dimensions de l'espace en diminuant la longueur de cohérence des sources.

Des lasers ultra brefs (~ 5 fs à 10 fs) sont aujourd'hui utilisés (et proposés commercialement) pour l'OCT. Une solution alternative est d'utiliser des sources blanches et un montage interférométrique compensé (Linnik, Michelson ou Mirau). Des images 3-D avec

un voxel de taille inférieure à $1\mu\text{m}^3$ sont ainsi produites à travers plusieurs centaines de microns de tissus.

g) Micro-holographie

Quelques groupes (France, Suisse, UK) poursuivent une recherche ayant le même objectif que celui de l'OCM mais en utilisant des montages holographiques (avec ou sans sources de cohérence limitée). Des résultats ont été obtenus en tirant partie des effets de double exposition (déformation de cellules neuronales).

La dynamique ne semble pas encore aussi grande qu'en OCT mais avec le développement spectaculaire de matériaux photoréfractifs et/ou de matrices CCD ou CMOS de réels progrès vont sans doute suivre permettant l'acquisition sans balayage et en une prise de vue du volume examiné.

Le marché est principalement celui, traditionnel, des microscopes destinés à la biologie. Dans les plateformes mises en place récemment dans les laboratoires CNRS ou INSERM il y a une forte dominante des constructeurs Japonais (Olympus) et Allemands (Zeiss et Leitz) et quasiment plus de représentation française (ce qui n'était pas encore le cas il y a une dizaine d'années).

Quelques petites entreprises (parfois rachetées par des grands groupes comme Thales-Optem USA) occupent des niches en proposant des accessoires qui complètent les microscopes (scanners, optique spécifique, filtres sélectifs en longueur d'onde, polariseurs et modulateurs de polarisation etc.)

Le gros marché périphérique reste cependant celui des sources et des détecteurs.

Les lasers à impulsions ultra brèves, qui coûtent plusieurs fois le prix des microscopes, reste captif des grandes compagnies (Coherent et Spectra Physics) bien que des start-up françaises (Amplitude systèmes) ou étrangères (Picoquant) proposent depuis peu des solutions originales et compétitives.

Pour ce qui des détecteurs, de plus en plus de montages utilisent des matrices CCD ou CMOS éventuellement refroidies ou amplifiées. Là encore, la représentation française semble faiblir au fil des ans (Philips France ex Radiotechnique n'est plus présente dans les salons au même titre que Hamamatsu etc.) seule Thales propose encore des matrices à haute résolution.

L'OCT est peut-être un cas à part, une filiale de Zeiss, puis la société mère ont vendu 1500 instruments de la première génération aux USA (ce qui a été jugé insuffisant pour couvrir les frais des études). Une activité plus importante a vu le jour à la fin des années 90 pour mettre sur le marché des outils plus performants proposés aujourd'hui.

4.1.2 La tomographie des tissus

L'étude de la propagation de la lumière à travers les tissus biologiques constitue depuis quelques années un domaine de recherche en expansion rapide. L'attrait des méthodes optiques par rapport aux techniques existantes (RMN, radiographie, ultrasons, traceurs radioactifs) vient du fait qu'elles sont non ionisantes, non invasives, qu'elles permettent dans certains cas d'atteindre de hautes résolutions (de l'ordre du micron) et qu'elles sont en général peu onéreuses.

La plupart des tissus biologiques possèdent une fenêtre spectrale de transparence (dite fenêtre thérapeutique) dans le rouge proche infrarouge utilisée pour faire pénétrer de la lumière dans ces milieux. La difficulté pour l'imagerie vient du fait que les tissus sont des milieux fortement diffusants pour les photons, et que l'organisation des structures responsables de cette diffusion est complexe.

On peut imaginer sans difficulté quelques uns des chemins que peuvent suivre les photons émis par une source impulsionnelle et se propageant vers un détecteur en analysant l'intensité détectée au cours du temps. Plusieurs types de trajectoires sont en effet possibles.

Les photons non diffusés ou « balistiques » se propagent en ligne droite dans le milieu et atteignent le détecteur après un temps $t_0 = d/v$ où d est la distance source-détecteur et v la vitesse de l'onde dans le milieu. Leur nombre décroît de façon exponentielle avec l'épaisseur de tissu traversée, pour une puissance injectée constante.

Les photons détectés ayant subi peu d'événements de diffusion ont une trajectoire plus compliquée et n'atteignent le détecteur qu'après un temps $t > t_0$. On parle ainsi de photons « serpentiles », qui se propagent de façon assez proche de la trajectoire balistique.

Enfin les photons « diffusés » constituent une partie d'autant plus importante de l'énergie propagée que la distance traversée est grande. .

Les approches expérimentales utilisent ces différentes catégories de photons: Le régime balistique est celui que nous avons déjà envisagé pour l'OCT ou les microscopies confocale et multiphotonique. La situation idéale pour l'imagerie consiste bien sûr à arriver à ne sélectionner que ces photons balistiques. En principe la résolution est de l'ordre de la longueur d'onde utilisée. Cependant la profondeur de pénétration de ces méthodes varie entre quelques centaines de microns et 1-2 mm dans les tissus biologiques, selon les moyens utilisés pour isoler les photons balistiques.

a) Transillumination

L'utilisation de photons diffusés pour faire de l'imagerie permet en principe de tirer des informations de régions profondes des tissus, mais au détriment de la résolution spatiale. En effet les équations de diffusion limitent la résolution, lors de la résolution du problème inverse, au tiers de la profondeur.

Les résolutions obtenues jusqu'ici sont de l'ordre du centimètre à des profondeurs de l'ordre de 3 cm ce qui correspond par exemple à la moitié de l'épaisseur typique d'un sein.

Une première approche consiste à utiliser une irradiation continue et plusieurs paires source/détecteur, et de résoudre le problème inverse. La difficulté réside dans le fait que la structure traversée est hétérogène, composée de couches d'épaisseurs non constantes et a priori non connues ; il est difficile d'obtenir des images précises de la morphologie des tissus de cette façon.

Une direction alternative actuellement explorée est d'effectuer une détection différentielle (deux détecteurs par source) et d'effectuer une triangulation de la réponse optique pour obtenir des informations fonctionnelles dynamiques. Ces techniques permettent par exemple de visualiser des zones d'activation cérébrales chez l'adulte à travers le crâne. Ici encore, la résolution est seulement de l'ordre du centimètre mais l'équipement est simple.

b) Tomographie par sélection temporelle des photons

La difficulté rencontrée avec une source continue peut être partiellement contournée en utilisant une source modulée à haute fréquence ou, ce qui est équivalent, une source émettant des impulsions brèves. Dans le cas d'une source à impulsions par exemple, l'utilisation d'une porte temporelle permet de sélectionner les premiers photons à émerger du milieu, c'est-à-dire ceux qui ont suivi une trajectoire quasi-balistique (photons « serpentiles »).

Des montages dérivés de l'optoélectronique rapide (cameras à balayage de fente, photomultiplicateurs multi anodes, lasers picoseconde ou composants HF des télécommunications optiques) sont employés pour ces montages.

Dans le domaine des sciences cognitives (apprentissage, étude du comportement) des casques contrôlant l'activation cérébrale sont aujourd'hui opérationnels, moins contraignants que les imageurs IRM ils n'en posséder pas encore la résolution.

Une application potentielle de ces techniques est la détection précoce de cancers et de tumeurs. La encore l'inversion de la mesure est difficile et il y a un fort besoin de produits de contraste qui permettraient d'opérer en mode différentiel.

c) Couplage lumière-ultrasons

D'autres méthodes, enfin, ne relèvent pas uniquement de l'optique mais font intervenir une forme de couplage entre le champ électromagnétique et un champ acoustique.

Leur but est de révéler des contrastes optiques mais avec une résolution qui est celle des ondes acoustiques (inférieure au mm).

On peut par exemple utiliser l'effet photoacoustique de la façon suivante : des impulsions infrarouges (quelques nanosecondes) sont envoyées dans l'échantillon, induisant un échauffement aux sites d'absorption. Cet échauffement induit des déformations locales des zones absorbantes, qui deviennent source d'ondes acoustiques. La difficulté vient ici de la mauvaise propagation des ultrasons de haute fréquence dans les tissus et de la multitude des zones sources qui complique l'inversion des mesures. Cependant, la détection de l'activation cérébrale chez le rat anesthésié a été démontrée en 2003 avec cette technique.

Les méthodes acousto-optiques utilisent une idée plus indirecte : un faisceau laser traverse le tissu et on enregistre la distribution complexe d'intensité (speckle) qu'il forme sur un détecteur à la sortie ; un transducteur ultrasonore est focalisé en une petite région de tissu parcourue par la lumière, et « agite » les diffuseurs présents à cet endroit. Selon les propriétés d'absorption au point focal, la modulation résultante sur la figure de speckle est plus ou moins importante. On peut se représenter le contraste observé en se rendant compte que les ultrasons créent une source virtuelle de lumière à l'intérieur du tissu dans la zone insonifiée.

Cette technique développée depuis quelques années possède actuellement une résolution de l'ordre du mm dans les trois dimensions de l'espace à travers plusieurs cm de tissu.

En conclusion les nombreux congrès et publications consacrés à cette imagerie optique des tissus font apparaître d'indiscutables succès, d'autres domaines progressent et ouvrent périodiquement la voie à des « niches » pour des applications nouvelles.

Signalons par exemple que GE Medical a acheté la société ART (Canada) pour construire un instrument de tomographie optique pour l'homme et le petit animal

Il nous semble qu'il y a encore de la place pour des initiatives originales hors des sentiers battus et que le marché des sources, des détecteurs et des produits de contraste devrait être largement stimulé par ces recherches.

Par contre l'industrie française, à l'exception de quelques niches, est absente du domaine de l'imagerie médicale.

L'optique et le diagnostic

4.2.1 Les nanosondes

De l'imagerie, à la thérapie et au diagnostic les sondes spécifiques (ou rendues spécifiques par fonctionnalisation) s'avèrent incontournables. Une vraie révolution s'est faite avec l'introduction de plusieurs protéines fluorescentes. Malgré l'énorme intérêt de ces outils biologiques fournissant directement une réponse optique les protéines fluorescentes restent « fragiles » et « blanchissent rapidement » (environ 10^4 photons émis avant destruction). C'est la raison pour laquelle il y a une forte demande pour des objets plus « robustes » : nanocritaux, particules métalliques, etc...

a) Du colorant aux protéines fluorescentes

La panoplie des molécules fluorescentes (fonctionnalisées ou non) utilisée en biologie est très large comparée à ce qui peut être utilisé en médecine. L'obtention récente de protéines fluorescentes dont la première a été la GFP (Green Fluorescent Protein) a été à l'origine d'une véritable révolution en biologie ; plusieurs autres protéines fluorescentes émettant dans le jaune ou le rouge sont à présent disponibles sur le marché. D'autres sources présentent des propriétés particulières comme celle d'être « photo-activables » par combinaison d'actions lumineuses et d'interactions biologiques.

La faiblesse de ces molécules vient de leur relative fragilité quand elles sont exposées à la lumière (blanchiment) et du large spectre d'émission qui ne permet l'utilisation simultanée d'un nombre limité d'émetteurs différents.

b) Nanocristaux

Les nanocritaux semi-conducteurs (Q.D. ou quantum dots) ont une taille inférieure au rayon de Bohr de l'exciton, les propriétés optiques (spectre) sont donc principalement dues à des effets de confinement quantique. Le spectre d'émission, plus étroit que celui d'un colorant typique, peut ainsi être réglé du visible au proche infrarouge (CdS). Si ces QD blanchissent 10^2 à 10^3 fois moins que les colorants elles posent quelques problèmes d'utilisation :

- L'émission est intermittente (Blinking combinaison d'effet tunnel et d'effet Auger),
- Il faut entourer le QD d'un autre matériau semiconducteur (ZnS) à grand gap pour éviter des effets de recombinaison de surface,
- On ne peut pas les utiliser directement à cause de leur caractère hydrophobe. Il faut les envelopper dans une coquille polymérique adéquate (Micelles).

Malgré ces inconvénients et sans doute une légère toxicité à long terme ces colorants connaissent un développement spectaculaire et sont disponibles commercialement. Les QD ne sont pas les seuls nanocristaux possibles, les cristaux à base de terres rares trivalentes (éléments actifs de nombreux lasers) robustes aux raies fines mais dont les temps de vie sont parfois longs (quelques centaines de microsecondes) font l'objet d'études de plus en plus nombreuses.

c) -Nanoparticules absorbantes ou diffusantes

Nous avons vu que, dans la panoplie des « signaux optiques » la fluorescence domine largement avec les avantages (sensibilité, sélectivité...) et les inconvénients (blanchiment,

« blocages » de nombreuses approches au niveau des brevets....) que nous avons parfois mentionnés. Les diffusions de la lumière par des particules dont la taille varie de 100nm à quelques microns est largement utilisée en biologie. L'absorption peut être une alternative intéressante elle est à notre connaissance au moins utilisée dans deux domaines :

En microscopie, on remarque que la section efficace d'absorption d'une sphère d'or est largement supérieure à sa section efficace de diffusion pour des dimensions inférieures à quelques dizaines de nm. On peut ainsi détecter l'échauffement des particules de quelques nm avec une très bonne sensibilité avec un montage confocal interférométrique.

En thérapie, on peut utiliser des coquilles d'or par exemple déposées sur des billes de silice de tailles nanométriques. En changeant l'épaisseur de la couche d'or, on peut déplacer la fréquence plasmon à travers le spectre visible et moyen infrarouge. Cela permet de créer une sélectivité dans l'énergie déposée à différentes profondeurs pour la photothérapie (en fait pour la thermothérapie).

d)- Diffusion de particules et interactions entre particules

On peut tirer profit d'un phénomène aussi nuisible que le blanchiment local pour analyser le retour de la lumière de fluorescence associé à la diffusion de (nouvelles) molécules fluorescentes dans la zone blanchie. Le FRAP (fluorescence redistribution after photobleaching) fait à présent partie de la panoplie des microscopistes . De la même façon les interactions à l'échelle moléculaire peuvent être traitées par la méthode FRET (fluorescence energy transfert) ou les balises moléculaires (molecular beacons). Dans le premier cas, il y a transfert d'énergie entre un accepteur fluorescent qui bloque la fluorescence du donneur dès que leur distance devient inférieure à quelques nm. Dans le second, le processus de fluorescence est bloqué tant que les deux particules sont voisines (fond noir) et l'émission prend place dès que la séparation dépasse quelques nm. Un système très efficace a été réalisé en bloquant la fluorescence d'un colorant avec une particule d'or.

4.2.2 Les microlabos et les biocapteurs

Le domaine de l'analyse biologique pour l'environnement ou la sécurité est certainement destiné à croître très rapidement. Des solutions pour des « lab on chip » commencent à voir le jour. L'optique y joue un rôle important mais sa place n'est pas automatiquement assurée pour l'avenir. Il faudra par exemple faire mieux que des solutions directement dérivées de l'électronique intégrée (FET ou MOSFET) et penser à introduire des solutions faisant appel au guidage des ondes, aux détecteurs et aux sources maintenant massivement intégrées.

a) Les biopuces

Depuis le séquençage de divers génomes (levure, homme, plantes etc....) un très grand nombre de puces à ADN ont vu le jour. Le nombre de réponses élémentaires varie de quelques dizaines pour des applications dédiées à plusieurs dizaines voir des centaines de mille pour le séquençage. L'optique est principalement présente au niveau de la détection et si la détection par fluorescence domine, on voit apparaître des solutions alternatives comme l'utilisation des plasmons de surface :

La résonance plasmon qui se produit dans une mince couche de métal noble (Au ou Ag) se manifeste par la quasi extinction du phénomène de réflexion totale pour une incidence particulière. Cet angle d'incidence est très sensible à l'évolution des propriétés diélectriques

de la surface. Longtemps utilisée pour la détection des réactions anticorps antigène cette méthode se miniaturise, l'information est multiplexée, et s'applique aux nouvelles puces (allergène).

D'autres approches opto-mécaniques voient le jour : micro leviers dont la fréquence de résonance varie avec la masse ou qui sont déformés par la tension superficielle induite par la réaction de surface.

Concernent les biopuces les entreprises françaises sont peu nombreuses par rapport au marché qui se présente (même s'il faut être prudent vis à vis des estimations de marché publiées)

c) Lab-on-chip

Il s'agit d'un véritable micro-laboratoire capable d'effectuer des analyses médicales. De même que la microfluidique est essentielle, dans ces systèmes, pour conduire les produits à analyser vers les réactifs l'optique pourrait jouer un rôle dépassant la simple détection. L'optique intégrée avec les fonctions de guidage, d'adressage, de commutation et de mesure efficaces et rapides devrait jouer dans ces dispositifs un rôle important si elle arrive à concurrencer les systèmes de détection purement micro-électroniques à base de transistors à effet de champ par exemple.

4.3. L'optique et le traitement : le laser et les interactions lumière-tissus

Dans les premiers brevets qui ont accompagné la naissance du laser un grand nombre d'applications qui nous paraissent aujourd'hui familières avaient été envisagées : bistouri laser, photo coagulateur, réalisation de micro points de suture etc.... . En effet, grâce à sa cohérence spatiale, il est possible d'obtenir avec le laser des grandes densités d'énergie ou de puissance.

D'autres applications de l'optique au traitement ne doivent pas être oubliées :

a) La photothérapie et le photo diagnostic

La photothérapie est basée sur l'interaction de la lumière avec des photosensibilisations ciblées qui se fixent aux cellules tumorales : la lumière active ces photosensibilisateurs en les rendant toxiques pour les cellules environnantes. L'interaction entre l'opticien et le biochimiste est un passage obligé, la compréhension des mécanismes de pénétration de la lumière à différentes profondeurs (à partir d'une source ou d'un endoscope fibré) est également essentielle. Au niveau du diagnostic, nous trouvons là encore, la fluorescence endogène ou induite par des marqueurs spécifiques. L'absorption permet également de mesurer l'oxygénation de l'hémoglobine (point isobestique vers 800 nm)

b) L'outil laser

À côté des approches traditionnelles que nous avons mentionnées comme le décollement de la rétine, on trouve le surfacage de la cornée. En chirurgie non invasive les fibres optiques s'imposent déjà pour déboucher les artères découper et percer des tissus divers.

Dans le domaine esthétique on ne saurait oublier le très gros marché que représente l'épilation par laser. Pratiquée par des médecins, elle donne, quand elle est bien utilisée, des

résultats spectaculaires et bénéficie des dernières nouveautés dans le domaine des sources. (ex. lasers à semiconducteurs)

Dans le secteur des lasers médicaux on trouve quelques entreprises française (Quantel, Cilas..) mais la majorité des constructeurs sont étrangers, alors que le potentiel de recherche est important.

4.4. Recherche, industrie et formation en optique biomédicale

Comme certains des champs couverts sont relativement récents, on ne doit pas s'étonner de trouver en France un domaine encore très peu structuré que cela soit au niveau industriel ou au niveau des laboratoires universitaires. Il faut noter que la recherche française qui était absente des congrès et des publications, à de rares exception près, il y a cinq ans y prend une place de plus en plus grande grâce à des contributions importantes mais encore isolées. Par contre, aucun industriel français n'était présent dans les expositions de « Biomedical optics » aux USA ou en Allemagne.

Remarquons cependant que plusieurs jeunes sociétés se battent sur un terrain difficile, assez peu épaulés par des aides de R et D du domaine public. Les opérations menées par le Ministère le CNRS, le CEA, l'INSERM ont été manifestement stimulantes mais restent très loin des programmes étrangers qui ont adoptés (même en période de crise) une attitude beaucoup plus volontariste aux USA bien sûr, mais aussi au Canada et en Europe avec une politique de recherche particulièrement ambitieuse menée par l'Allemagne et le Royaume Uni.

Jusqu'où faut-il s'engager, peut-on craindre une « bulle » de l'optique biomédicale ? Les prévisions en terme de marché sont multiples et peu édifiantes (la thématique et ses limites sont, il faut le dire, encore mal définies) il reste cependant que la croissance du marché est très rapide (30 à 40% par an selon les sources).

Il nous semble, compte tenu du retard français actuel, qu'il faut favoriser des « niches » correspondant à des opérations rapides de transfert. Nous ne disposons pas de la masse critique pour avoir actuellement des échanges gratifiants entre le secteur industriel et celui de la recherche. Cette faiblesse du secteur industriel pose également la question de la formation. Nous formons encore peu de spécialistes de ce domaine à l'Université avant la thèse (quelques DESS ou DEA à l'université ou MASTERS existent déjà dans les écoles d'ingénieur). Par contre que de plus en plus d'étudiants ayant une formation générale de haut niveau souvent excellente sont attirés par ce domaine et y passent des thèses de très bonne qualité scientifique (cette tendance est aussi largement vérifiée à l'étranger). Pour l'instant beaucoup de ces docteurs ont trouvé des emplois dans le monde académique qui souhaitait renforcer ces thématiques, faut-il continuer sans la présence du tissu industriel correspondant ?

Pour éviter que le domaine de l'optique biomédicale se désertifie, il faut que les pouvoirs publics assurent pour quelques années des postes de « post doc » qui associeraient par exemple une start-up et un labo. Le nombre de post-doc français quittant notre pays sur cette thématique devient en effet inquiétant et une réaction rapide s'impose.

4.5 Recommandations

La recherche française en biophotonique est réalisée par un nombre restreint d'équipes et de laboratoires motivés appartenant au CNRS, à un certains nombres d'établissements universitaires et au CEA et qui obtiennent des résultats significatifs. Il existe des groupements de recherche qui coordonnent des actions dans ce domaine par exemple le GDR 2588 « Microscopie fonctionnelle du vivant » et un certain nombre de réseaux de laboratoires se sont mis en place.

Il est donc nécessaire

- de structurer et de renforcer les équipes existantes par des postes types post- doc
- de lancer un programme national autour de la thématique de la biophotonique
- d'augmenter les coopérations optique-chimie-biologie et aussi recherche-industrie par la création d'équipes mixtes
- de favoriser la création de jeunes pousses (start-up) sur des niches où le transfert est possible rapidement

LE MARCHE DE LA BIOPHOTONIQUE

Le marché actuel de la biophotonique, estimé à 25 milliards de dollars, selon les sources, pourrait décupler d'ici 2012.

D'après une étude du cabinet canadien « Strategic Health Innovations » en 2001, le marché mondial de la biophotonique, pour le seul segment santé devrait être de 8 milliards de dollars en 2005, avec un taux de croissance annuel de 45%.

Marché global du Laser Medical

WORLDWIDE MEDICAL-LASER MARKET REVENUES (\$ millions)					
		2001	2002	Compounded Growth Rate	
	1999	2000	Estimated	Forecast	'99-'02
Market Area					
Worldwide	1954	2250	2055	2236	5%
United States	1290	1463	1336	1453	4%
Market Segment					
Surgical	707	810	660	695	-1%
Ophthalmic	442	600	560	615	12%
Diagnostic	180	210	240	269	14%
Therapeutic	60	70	80	90	14%
Accessories/Service/Royalties	565	560	515	567	0%

Source: Spectrum Consulting, December 2001

Marché des lasers médicaux en tant que composants

EQUIPEMENT MEDICAL					
Ce marché comprend les lasers utilisés pour l'ophtalmologie (incluant la chirurgie réfractive et la photocoagulation), la chirurgie, la thérapie, l'imagerie ou les applications en cosmétologie.					
	1999	2000	2001	2002	2003
Ventes en milliers d'unités	13,7	14,5	12,6	10,6	11,3
Revenus en millions de dollars	436	629	471	347	383

Source : Review and forecast of the laser markets, Laser Focus World 2003

INSTRUMENTATION MEDICALE					
Ce marché recouvre l'instrumentation biomédicale (utilisées pour les cellules ou les protéines telles que la cytométrie ou le séquençage d'ADN), les appareils d'analyse (tels que la spectroscopie laser Raman, la spectrofluorométrie, et l'ablation) et les microscopes à lasers.					
	1999	2000	2001	2002	2003
Ventes en milliers d'unités	37,1	39,9	34,5	33,0	34,3
Revenus en millions de dollars	31	36	57	47	52

Source : Review and forecast of the laser markets, Laser Focus World 2003

Marché des Biopuces

WORLDWIDE MARKET FOR MICROARRAYS, ARRAYERS, SCANNERS AND MICROFLUIDICS, THROUGH 2005 (\$ Millions)			
	2000	2005	AAGR % 2000-2005
Microarrays	225.9	535.8	18.9
Arrayers	51.4	86.6	11.0
Scanners	86.0	224.8	21.2
Microfluidics	34.0	219.8	45.2
Total	397.3	1067.0	21.8

Source: Business Communications Company, Inc.

Marché des Biocapteurs

SALES OF BIOSENSORS, 1998-2003 (\$ Millions)			
Market	1998	2003	AAGR % 1998- 2003
Medical	692	1,555	17.6
Industrial	10	40	32.0
Environmental	8	14	11.8
Government	11	13	3.4
Research	44	55	4.6
Total	765	1,677	17.0

Source: Business Communications Company, Inc.

Marché US du Diagnostic Médical

U.S. MDK APPLICATIONS MARKET AT U.S. MANUFACTURERS' SALES LEVELS, THROUGH 2006 (\$ Millions)			
	2001	2006	AAGR% 2001-2006
Clinical laboratory testing (includes infectious disease, drug, hormone, cancer and blood/urine chemistry testing)	1,560.0	1,808.5	3.0
Home-use	1,120.8	1,646.8	8.0
Research	830.5	1,368.2	10.5
Veterinary testing	296.0	327.0	2.0
Total	3,807.3	5,150.5	6.2

Source: Business Communications Company, Inc.

Marché US de l'Imagerie Médicale

U.S. DIAGNOSTIC IMAGING SALES BY MODALITY, 1999-2004 (\$ Millions)			
	1999	2004	AAGR % 1999-2004
X-ray and digital X-ray	1923.5	2794.5	7.8
CT and ultrasound	1707.2	2091.1	4.1
Nuclear medicine	401.7	474.4	3.4
Total	4032.4	5360.0	5.9

Source: Business Communications Company, Inc.

Marché US de l'Instrumentation d'Analyse

U.S. Market for New Analytical Instruments, 1997-2007 (\$ Million)			
Product	1997	2007	AAGR% 1997- 2007
New Generation Spectrometers and Chromatographs	65.2	390.4	19.6
New Generation Microscopes and Other Instruments	95.1	495.7	17.9
Total	160.3	886.2	18.7

Source: Business Communications Company, Inc.

Marché des dispositifs non invasifs

NONINVASIVE AND MINIMALLY INVASIVE MEDICAL DEVICE MARKET (\$Billion)				
	1997	1998	2003	AAGR% 1997-2003
DIAGNOSTIC DEVICES: Imaging equipment, patient monitoring devices, audiology testing devices	4.2	4.59	5.68	5.0
THERAPEUTIC/MIXED-USE DEVICES: Lasers, lithotripsy devices, pain suppression, endoscopes	1.4	1.56	2.5	10.0
TOTAL	5.6	6.15	8.18	7.9

Source: Business Communications Company, Inc.

Chapitre 5

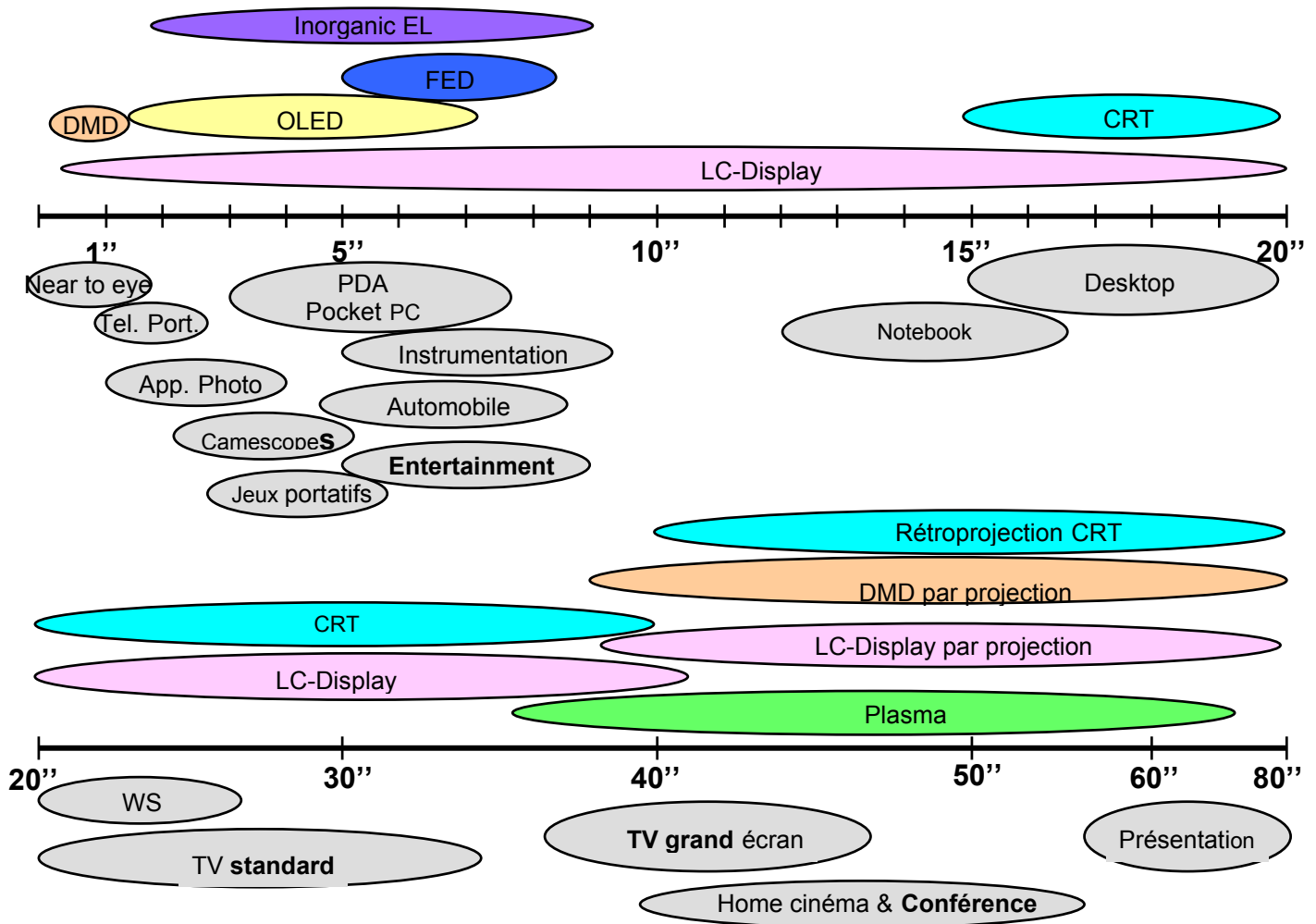
VISUALISATION, HOLOGRAPHIE, TRAITEMENT OPTIQUE de L'IMAGE

ECLAIRAGE, ENERGIE

5.1 Visualisation

5.1.1 Positionnement du domaine

Le domaine de la visualisation couvert dans cette partie est relatif à l'ensemble des technologies d'afficheurs qui permettent la présentation d'une image et à ce titre ne traite pas des fonctions d'affichage de type alpha-numérique ou symbolique qui ne font pas appel à un adressage matriciel. Ces technologies couvrent un vaste ensemble d'applications¹ pour lesquelles les exigences sont parfois très différentes de par le nombre points, la résolution, la taille de l'image, la cadence image ou à cause de leur environnement d'utilisation.



¹ PDA: Personal Digital Assistant, WS: Workstation, TV: Télévision

Au travers de la représentation synthétique précédente, qui permet de classer ces applications par taille d'image et en fonction des technologies², trois grands domaines se détachent pour lesquels les offres technologiques sont très différentes :

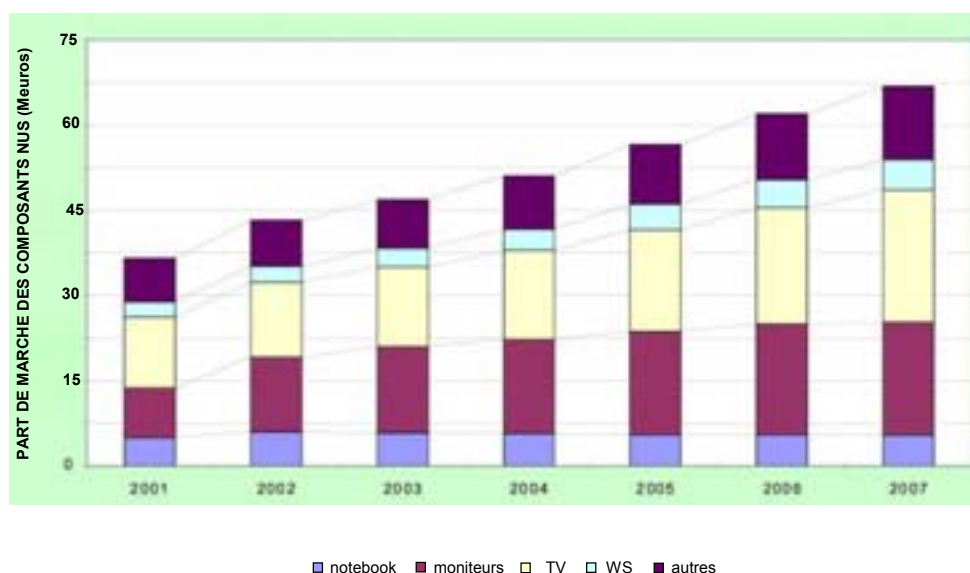
- Les petits formats d'image < 10'' avec un large éventail de technologies et d'applications,
- les moyens formats de 10'' à 35'' principalement centrés sur les applications télévision et informatique et avec deux technologies concurrentes LCD et CRT,
- les grands formats d'image > 35'' qui correspondent à un marché encore à faible diffusion essentiellement basé sur les systèmes de projection.

En marge de ces principaux segments de marché, il faut noter l'existence d'une niche relative au domaine de la « réalité virtuelle ». Il propose la vision d'image au travers d'un système optique (oculaire, lunette ou casque). De nombreux acteurs prospectent dans ce créneau en mettant en œuvre des architectures variées aussi bien pour des applications civiles (ex. PC sur lunettes) que pour des programmes militaires (équipement du fantassin du futur). A l'aide de cette première analyse, on constate déjà qu'une très forte évolution du domaine visualisation a eu lieu durant ces quinze dernières années avec :

- d'une part avec l'explosion du nombre de produits sur le marché, auparavant centré sur la TV et les moyens formats qui correspond à l'évolution récente du secteur « multimédia »,
- d'autre part l'apparition d'une nouvelle technologie dominante, le LCD sur l'ensemble des formats images qui progressivement remplace le CRT.

5.1.2 Positionnement des technologies d'affichage

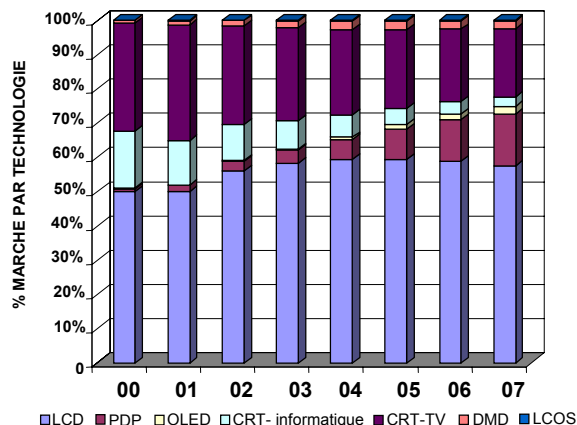
Le marché global de l'affichage a dépassé les 40 milliards d'euros en 2002 et devrait atteindre près de 70 milliards d'ici 2006³. La répartition des parts de marché pour les composants ou modules nus est donnée dans le diagramme ci-dessous.



² EL : Electro-Luminescence, FED : Field Emission Display, DMD : Digital Micro-mirror Device, OLED: Organic Light Emitting Devices, CRT: Cathodic Ray Tube, LC Display: Liquid Crystal based Display - Projection au sens large : frontale ou retro.

³ Estimation réalisée à partir de diverses sources

L'analyse suivante, présentée cette fois-ci par type de technologie, montre que le marché se partage principalement entre les écrans à tube cathodique et les écrans plats, qui à partir de 2002 ont pris la tête avec plus de 50% des parts.



La part des écrans plats devrait approcher 75% du marché en 2006, principalement tiré par la forte croissance des segments PC portables, moniteurs et « grand public ». La télévision sur écran plat a été présentée au salon IFA d'août 2003 comme étant le segment de marché en terme de surface produite qui pourrait tirer l'industrie dans les années à venir.

LE TUBE CATHODIQUE : CRT

Cette technologie d'affichage émissive longtemps dominante dans tous les domaines d'applications (de 0.5 à 40'') a vu depuis environ 5 ans mais régulièrement sa position reculer avec l'industrialisation de la technologie LCD.

Ce recul est maintenant très marqué sur les CRT pour application informatique (moniteurs) pour lesquels le marché a diminué de plus de 50%. L'analyse de ce recul constitue un exemple de rupture technologique majeure dans le domaine de l'optique qui s'est opéré à partir de l'apparition d'un nouveau segment de marché, l'informatique portable. Il a permis le développement de la technologie LCD à l'abri de toute concurrence. A cause de la réduction des coûts de production les LCD ont d'abord attaqué les produits à forte valeur ajoutée (WS, moniteur) puis très récemment le segment plus compétitif de la TV domestique.

Dans le cas des applications TV, le marché est stable en volume, même en croissance dans certaines régions comme la Chine, mais le revenu généré baisse. Thomson, qui produit son propre verre en partie sur le territoire, a aussi un centre technique important en France qui pilote les usines du monde entier. Il est certain que la gestion des 10 ans durant lesquelles le CRT TV devrait encore être produit en quantité (150 millions d'unités par an) est une question majeure. En effet il s'agit d'une activité rentable demandant peu d'investissements en regard de ceux nécessaires pour la production de grand LCD TV, inenvisageables en Europe, dans le contexte actuel où l'industriel seul doit en supporter le coût.

LES TECHNOLOGIES A EMISSION DE CHAMP

Il n'y a pratiquement plus de produits sur le marché à base de cette technologie, les premières applications à basse tension d'anode n'ayant pas pu résister au déferlement de la filière LCD. Les problèmes liés à la génération suivante, à haute tension d'anode, (durée de vie, évolution des pointes, coût, ...) n'ont pas pu être surmontés bien que Candescant, par exemple, ait démonté sur un écran 13'' de très belles images.

Cependant, ces travaux ont permis de démontrer le potentiel énorme de cette filière pour la télévision et la recherche s'est réorientée vers les technologies à nano-tubes de carbone (CNT) jugés plus robustes que les micro-pointes et émettant dans de meilleures conditions. Dans le cas des CNT la première difficulté réside en une mise œuvre contrôlée (localisation, orientation, densité ...) et en un process à température raisonnable. Des progrès considérables ont été réalisés très récemment sur ce point clé, les laboratoires vont donc à nouveau pouvoir se consacrer à la démonstration d'écrans. Il sera donc possible de mieux juger du potentiel de cette technologie, les avantages attendus sont l'angle de vue, la rapidité, la luminosité et une très faible consommation.

De nombreux laboratoires travaillent sur ce sujet, avec une importante communauté en France (Ecole Polytechnique, LETI, Thales) mais également sur des effets similaires : SCE, BSD ...

LA TECHNOLOGIE PLASMA

Cette technologie d'écran plat également émissive était pressentie dès les années 90 comme le successeur du CRT sur le créneau des moyens-grands formats dédiés à la télévision haut de gamme. Très tôt, l'Europe (Thomson à Grenoble suivi plus tard par la R&D de Philips) et l'Asie (avec la mise en place précoce de chaîne de production) s'étaient positionnées sur cette filière. Bientôt elle se retrouvera au coeur d'une compétition serrée avec deux concurrents : le LCD en vision directe et le projecteur à base de micro-displays, tous visant le marché grand public actuellement détenu par les rétro-projecteurs CRT.

L'argument déterminant dans cette compétition apparaît aujourd'hui plus économique que technique. En effet, bien que cette technologie semble encore disposer d'un réservoir d'amélioration pour la qualité des images et de ses coûts elle n'adresse qu'un segment de marché particulier (40-60'') alors que les LCD tendent à se positionner sur l'ensemble des marchés y compris celui-ci. Par ailleurs, les énormes investissements dont se montre capable l'industrie LCD et l'ampleur des moyens de R&D lui donne un avantage certain sur le Plasma. De plus, même si celui-ci bénéficie d'un avantage important en angle de vue par rapport au LCD en vision directe, la technologie plasma se trouvait encore récemment désavantagée par une limitation en luminance et un sur-coût imposé par la réglementation d'émissions de radio-fréquences. Ces problèmes peuvent être résolus (en particulier par l'amélioration régulière de l'efficacité lumineuse) avec un impact sur les performances et le coût des produits finis. On assiste en fait à une course de vitesse entre les investissements LCD nécessaires pour faire face à une demande qui couvre tous les formats et les dernières étapes d'évolution technologique des écrans Plasma qui sont déjà en sur-capacité industrielle.

Les acteurs du Plasma sont désormais asiatiques FHP, Pioneer, Matsushita, Samsung et LG pour les principaux. Depuis fin 2003 THOMSON s'est recentré sur les aspects électroniques pour l'amélioration de la qualité image en étroite collaboration avec le coréen LG.

L'ELECTROLUMINESCENCE ORGANIQUE

L'intérêt suscité par les matériaux électroluminescents organiques (petites molécules OLED ou polymères PLED) s'explique hormis son caractère émissif par la combinaison de caractéristiques qui présentent un intérêt évident en visualisation, à savoir :

- un dispositif tout solide avec à plus long terme une évolution vers écrans souples,
- une faible tension de fonctionnement ($<5V$) compatible des méthodes d'adressage actif, dérivées des celles utilisées pour le LCD,
- une faible consommation particulièrement adaptée aux produits mobiles,
- une émission directe dans tout le domaine du visible (par la chimie du matériau),
- une compatibilité avec une haute cadence image (réponse du matériau à la μs),
- une capacité à faire de très petits pixels ($\sim 100nm$ de matériau actif),
- une technologie plus économique que le LCD (matériau et coût de production).

La propriété intellectuelle est principalement partagée suivant les deux filières technologiques⁴ où les leaders sont Kodak et UDC ou CDT et DuPont. Il existe aujourd'hui des portefeuilles brevets (matériaux ou architectures) avec lesquels les acteurs industriels devront impérativement négocier le licensing afin de bénéficier des meilleurs atouts pour être compétitif sur cette technologie.

Bien que tous les problèmes techniques ne soient pas encore complètement résolus⁵, certaines sociétés toutes asiatiques (Pioneer, Sanyo-Kodak Display, RiTdisplay Corp., TDK, Samsung-NEC Mobile) sont déjà entrées en production (téléphone portable, autoradio) en ciblant les petits écrans portables, moins sévères au niveau des spécifications et principalement à matrice passive. D'autres acteurs (Sony, Samsung, AUO, CMO, ...) se préparent déjà activement à lancer des écrans à matrice active pour des applications à plus long terme pour la télévision de 20 à 30". Dans ce cadre il reste bien sûr de nombreux points très importants à valider. C'est pour cette raison, que la recherche sur les technologies OLED/PLED s'est très fortement intensifiée depuis mi-2003.

L'un des points clés pour ces applications de plus grandes tailles est l'adaptation de cette technologie aux matrices actives, secteur principalement contrôlé par les industriels asiatiques du LCD (Corée, Taiwan). Pour contrebalancer cette position dominante, de nombreux pays (Etats-Unis, Allemagne, Japon ou Chine) aujourd'hui absents de la filière LCD s'engagent également dans des programmes importants et investissent au niveau industriel. En Europe, on peut citer le programme de recherche allemand OLEDFAB soutenu par le ministère, regroupant des industriels et des universités, dont le but est de développer l'ensemble des briques technologiques ainsi que l'équipement industriel pour la réalisation d'écrans OLED à haute efficacité.

Au niveau national, la France a un peu tardé à reprendre de l'activité dans le domaine de l'électroluminescence organique. Cependant, Thales, Thomson, Corning et le CEA ont décidé d'unir leurs efforts au travers de moyens mis en commun sur la « Plate-forme Electronique Grande Surface » PEGS, créée en janvier 2003, avec entre autre vocation la mise au point de la technologie de type molécules évaporées (OLED). Enfin, Thomson et CDT viennent de signer un accord pour mener un programme de R&D qui vise à évaluer les écrans à matrice active de type polymères (PLED). Au niveau universitaire, un certain nombre de laboratoires

⁴ OLED : technologie de molécules évaporées (Kodak, UDC) ou PLED : technologie polymère (CDT, DuPont)

⁵ détaillées par P. Lebarry au Tome II dans le rapport OLED

commencent à s'équiper pour étudier la physique de l'électroluminescence organique, par contre, seuls quelques laboratoires de chimie macromoléculaire en région Aquitaine ont une petite activité dans la synthèse des matériaux.

L'ELECTROLUMINESCENCE INORGANIQUE

Très peu acteurs industriels persistent dans ce domaine, au Canada Luxell propose des produits dédiés à des applications professionnelles. Un autre canadien, iFire, développe cette technologie sur la base de nouveaux matériaux incluant un diélectrique épais (TDEL). Cette recherche, proche d'un développement de produit vise le marché des téléviseurs en « grand-moyen format ». IFire est associé à DNP et a aussi des relations avec Sanyo et TDK.

LA TECHNOLOGIE CRISTAL LIQUIDE

La technologie à cristaux liquides est maintenant présente dans tous les formats d'image. Il existent de nombreux modes du cristal liquide⁶, leur choix dépend des applications. Le TN est l'un des effets les plus utilisés pour des applications allant du simple afficheur à segments à l'écran haute résolution, le STN est adapté aux écrans à faible multiplexage monochrome (MSTN) ou (CSTN) pour la couleur, avec une demande qui se généralise pour les écrans nomades de moyenne gamme. Les modes IPS ou VA sont plutôt utilisés pour avoir un grand angle de vue en particulier destiné aux applications télévision.

Plusieurs catégories sont à considérer suivant le mode d'adressage électronique de ces écrans selon que :

- l'adressage de type matriciel est passif et que le signal électrique est véhiculé jusqu'au pixel par une simple matrice de lignes et colonnes conductrices. Les technologies passives sont particulièrement simples et dédiées aux applications à faible contenu d'information.
- l'adressage actif comporte un transistor TFT⁷ par pixel pour maintenir le signal électrique à ses bornes. De ce fait, le nombre de lignes adressables et la cadence image sont augmentées. Les écrans à matrice active sont donc plutôt adaptés aux applications informatique et vidéo. Ces circuits électroniques sont réalisées sur verre en silicium soit amorphe, soit poly-cristallin. Ce dernier permettant un degré d'intégration supérieur de l'électronique s'avère moins cher pour les écrans de petites tailles.
- l'adressage actif est assuré par un circuit intégré, en Silicium mono-cristallin, recouvert d'un miroir pour constituer l'un des substrat de la cellule cristal liquide. Cette technologie appelée LCOS⁸ permet principalement la réalisation de micro-displays avec des résolutions très élevées (pixel < 10 microns), généralement utilisés en projection.

Enfin, la technologie LCD, étant non émissive elle nécessite l'utilisation d'un dispositif d'éclairage à base de lampe ou de tubes fluorescents. On note pour ces dispositifs une évolution vers l'utilisation de LED, celles-ci offrant de nouvelles possibilités (étendue chromatique, meilleur rendu du mouvement, compacité) même si leur efficacité d'éclairage reste encore inférieure aux tubes fluorescents.

⁶ TN : Twisted Nematic, STN: Super Twisted Nematic, MSTN et CSTN resp. Monochrome et Color Super Twisted Nematic, IPS: In Plane Switching, VA: Vertically Aligned

⁷ TFT : Thin Film Transistor

⁸ LCOS : Liquid Crystal On Silicon

La France, contrairement aux US, a su anticiper grâce à un effort de R&D important, les évolutions induites par l'émergence de la filière LCD pour certains produits (rétro-projection, instrumentation avionique). Cette politique coûteuse a permis à ces entreprises de maintenir le positionnement de leurs produits au niveau international ou d'accroître leur périmètre d'activités (Thales Avionics n°1 en Europe et n°3 mondial dans les équipements IHS⁹).

Dans la filière cristal liquide, la France est présente au travers de la plate-forme PEGS pour le développement de matrice active en Silicium poly-cristallin, de la fonderie silicium ATMEL de Grenoble qui contribue à la R&D dans le domaine LCOS, de Thales-LCD pour la production de visualisation avioniques (technologie silicium amorphe). En complément la France comporte un nombre significatif de PME développant des activités plus spécifiques pour la production de petits écrans en technologie bistable avec Nemoptic, ou connexes à la technologie des écrans, pour l'étude de machines de production avec UNAXIS, pour les dispositifs d'éclairage (à base de LED avec PHLOX, ...) ou encore développent certains équipements de caractérisation (ELDIM) ou de production (SOPRA) ...

LES TECHNIQUES DE PROJECTION

L'accessibilité au grand format d'images > 40'' se fait au travers d'un système d'imagerie par projection à partir d'un plus petit format. Aujourd'hui la technique dominante est en rétro-projection TV est le CRT.

Cependant de manière à optimiser la compacité et le coût de ces dispositifs on a cherché à exploiter les technologies de plus petits afficheurs qui sont compatibles de la génération d'images à haute luminance et à haute résolution. Les produits commerciaux sont principalement en projection frontale et utilisent des micro-display en technologie soit DMD (micro-miroirs monopole de Texas) soit LCD poly-cristallin haute température. La diffusion d'images à très haute résolution (capacité TVHD ou cinéma électronique) devrait favoriser le choix des micro-imageurs LCOS (cristal liquide sur silicium). Dans ce contexte, cette technologie moins mature pourrait à l'horizon 2006 offrir un avantage coût/résolution. L'obtention de la luminance dans un encombrement réduit (donc avec de petites optiques), la qualité du contraste d'image (absence de speckle) sont les étapes décisives à franchir pour voir un développement, de ces techniques projection micro-display, pour les très grands formats qui représentent moins de 20% du marché de la visualisation.

La France, avec Thomson, ATMEL et Thales, possède un potentiel de développement important dans le domaine de la projection par LCOS, entretenu en particulier au travers de programmes R&D dont certains sont menés en collaboration au niveau européen (Alcatel, Barco, Merck, IMEC, UCL). En production, le centre Thomson d'Angers est dédié aux produits rétro-projecteurs toutes technologies.

⁹ IHS: Interface Homme-Système

Plusieurs technologies adressent le besoin papier électronique qui nécessite un effet mémoire pour maintenir l'image lorsque l'alimentation est coupée. Elles sont regroupées ici pour compléter l'analyse des techniques de visualisation. Il s'agit de la mise en œuvre des effets physique suivants :

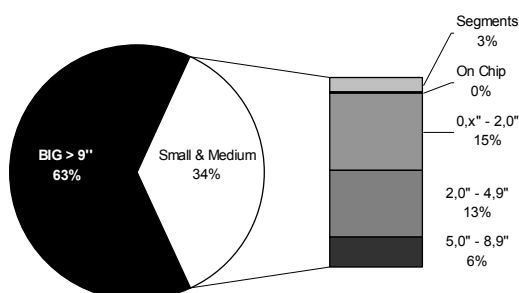
- la bi-stabilité dans les cristaux liquides par effets d'ancrage de ZBD (UK) ou Nemoptic en France avec un exemple tout à fait remarquable de transfert industriel vers l'Asie,
- l'électrophorèse (SIPIX, E-Ink en collaboration avec Philips), ou plus émergent encore avec des effets à base de MEMS (Iridigm).

5.1.3 Positionnement des marchés par format image

LES PETITS AFFICHEURS¹⁰ < 12''

La segmentation du marché

Le marché des LCD est clairement dominé en revenu par les écrans de grande taille, comme l'indique le diagramme suivant :



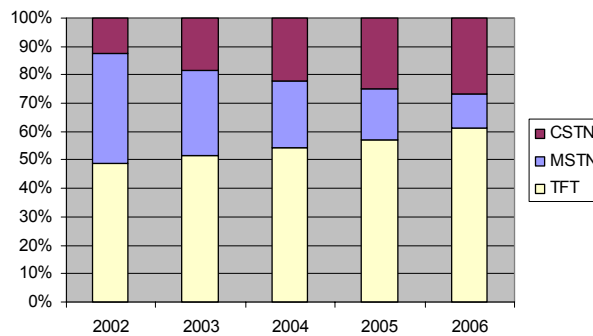
En revanche, le ratio en unités est inverse puisque les écrans de moins de 9'' (y compris les afficheurs dédiés) représente 2.4 milliards d'écrans livrés¹¹ contre 67 millions. En 2003, les afficheurs pour téléphonie mobile représentent plus de 42% du segment des petits écrans. Les autres applications se situent autour de 7 à 10% de part de marché chacune. Elles sont essentiellement automobile et grand public avec en particulier le secteur des appareils photos et caméscopes, produits à forte valeur ajoutée dominés par les Japonais.

Une technologie mature pour les afficheurs : les cristaux liquides

La technologie à cristaux liquide est la seule technologie utilisée dans les écrans de petit et moyen format. Elle se divise en deux catégories, suivant que le mode d'adressage de ces écrans est de type passif (CSTN et MSTN, resp. couleur et monochrome) ou actif (TFT).

¹⁰ Rapport détaillé par C. Joubert et A. Le Jemtel au Tome II

¹¹ Source: DisplaySearch Q1'03



Part de marché relative par type de technologie cristal liquide

D'une manière générale, ce sont les technologies passives qui sont les mieux adaptées aux applications à faible contenu pour lesquelles coût et autonomie sont les facteurs déterminants. On note une forte évolution vers la couleur et pour une résolution accrue, avec une demande importante pour les marchés de la téléphonie mobile et du PDA qui profite au TFT.

Les technologies émergentes

La technologie émergente qui suscite le plus d'intérêt actuellement, tant au niveau de la R&D que de l'industrialisation, est la technologie OLED. Compte-tenu des problèmes technologiques à résoudre, la tendance actuelle la positionne sur les petits formats et pour des applications nomades moins sévères au niveau des spécifications. Le nombre d'écrans OLED produits en 2003 sera proche de 20 millions d'unités. Il devrait fortement croître pour générer un revenu de \$3 milliards en 2007. Il s'agit aujourd'hui principalement d'écrans OLED à matrice passive sauf le 2.1'' pour l'appareil photo de Sanyo-Kodak.

D'autres technologies LCD bistable, électrophorèse... cherchent à se positionner sur de nouvelles applications des écrans, par exemple l'application e-book (livre électronique) où le critère consommation interdit l'utilisation des LCD classiques.

Position de la France

Les fabricants de LCD sont presque exclusivement asiatiques, répartis majoritairement entre le Japon, la Corée et Taiwan, et prochainement la Chine. Les US sont totalement absents, et l'Europe est présente grâce à Philips, qui a fondé une JV avec LG, géant Coréen du domaine. Hors Asie, le seul fabricant est Thales avec son usine de TFT de Moirans (écrans de 2'' à 12'' de diagonale), présent sur le marché de niche des **LCDs dédiés à l'avionique**¹². Domaine dans lequel la technologie LCD à matrice active domine aujourd'hui le monde des cockpits modernes. Pour ces équipements, toutes évolutions à venir nécessitera de satisfaire à des contraintes d'environnement très sévères (gamme de -55°C + 125°C pour le militaire, et de -40°C + 85°C pour le civil) avec une exigence particulière sur les coûts de maintenance et la gestion de l'obsolescence puisqu'un avion se doit de fonctionner au moins 20 ans.

¹² détaillé par F.Delauzun dans le rapport « visualisations avioniques » au Tome II

Dans le domaine des petits afficheurs nomades, Nemoptic a concédé une licence de fabrication de sa technologie de LCD bistable (BiNem) à un acteur taiwanais pour le développement d'une chaîne de production d'E-book destiné à un marché chinois de grand volume pour le « livre scolaire ».

Sur le créneau des **OLED**, la France a mis en place début 2003 une plate-forme technologique PEGS¹³, pour mutualiser des équipements compatibles avec la technologie LCD ainsi qu'un GDR « Composants Organiques pour l'Opto-électronique » CO2, destiné à favoriser la collaboration entre physiciens et chimistes pour la compréhension des mécanismes de base encore nécessaire au développement de cette technologie. Mais des problèmes plus technologiques comme l'encapsulation et le dépôt des polymères par jet d'encre ne sont pas abordés au niveau national.

LES AFFICHEURS MOYENS FORMATS DE 12'' A 35''

Dans ce secteur des afficheurs moyens formats, la situation est très particulière dans la mesure où elle n'adresse que deux types d'application : l'informatique et la télévision. Dans ce segment le monopole du CRT est depuis peu ébranlé par la concurrence légitime des technologies d'écrans plats, principalement le LCD, maintenant présent sur l'ensemble de ce format avec la mise sur le marché en 2002 des formats 35'', et marginalement le Plasma.

Dans le secteur informatique, la technologie LCD est l'unique solution pour les portables. Elle s'est progressivement positionnée depuis 5 ans sur le marché des postes fixes (desktop et workstation). Sur ce segment, 2002 constitue une étape importante puisque les ventes de LCD ont dépassé celles des CRT malgré un contexte de récession économique. Selon une étude de iSupply/Stanford Resources, le marché du CRT devraient continuer à reculer en 2003 : l'écran de 17'' est le principal produit touché avec une chute des ventes de 25% en 2002.

Dans le secteur TV, les mêmes analystes prévoient également une explosion du marché des écrans plats aujourd'hui proche de 3 millions pour atteindre les 12 millions d'unités en 2007.

Vers une technologie unique LCD pour l'ensemble des moyens formats

Les écrans LCD utilisés, dans ce segment des moyens formats, sont nécessairement à matrice active puisque ces applications nécessitent soit contenu élevé (informatique), soit une fréquence image vidéo (télévision). En 2002, plus de deux tiers du marché des écrans à TFT a concerné le secteur des moniteurs et ordinateurs portables. Avec la mise sur le marché depuis un an des écrans LCD TV de 30'' et plus, on pressent qu'elle peut progressivement prendre le pas sur la technologie CRT pour l'ensemble des applications moyens formats. Dans les plus grandes tailles de ce segment (> 30'') l'angle de vue devient un paramètre important pour percer dans le domaine de la TV. Aussi, l'amélioration de la technologie TN par la maîtrise, de films de compensation ou de techniques d'adressage performantes, pourrait permettre d'atteindre des coûts plus compétitifs que les solutions actuelles (IPS ou VA). Le plasma de fait se cantonnerait donc progressivement aux grands formats à partir de 40''.

¹³ PEGS : Plateforme Electronique Grande Surface (Thomson, Thales, Corning, CEA-LETI)

OLED, une prochaine alternative pour la télévision ?

S'il est admis que le marché OLED se développe déjà sur le marché des petits écrans portables, le second segment, qui devrait se développer à partir de 2007, est celui des écrans de 20 à 30'' pour application télévision ou PC portable. Dans ce cadre, il reste encore des axes importants à explorer pour :

- Développer des matériaux à haute efficacité,
- Résoudre les problèmes d'inhomogénéités de pixel à pixel,
- Mettre en place des procédés industriels adaptés aux grandes tailles,
- Adapter la technologie OLED aux matrices actives bas coût,
- Encapsuler des écrans de grandes tailles.

Pour cette raison, d'une part la recherche OLED/PLED s'est fortement intensifiée courant 2003 et d'autre part parce que de nombreux pays soutiennent des programmes de recherches ou d'investissement dans les équipements industriels (Japon, Corée, US, Allemagne ...)

Position de la France :

Sur le créneau des produits moyens formats la France est désormais **absente hormis en CRT**. Dans ce secteur pour lequel les contraintes de coût de production et les niveaux d'investissement sont significatifs, il ne semble pas réaliste d'envisager une évolution, même à moyen terme sur les technologies déjà commerciales.

Par contre, avec l'essor probable de la filière **OLED** n'y a t il pas une **réelle opportunité** pour valoriser l'ensemble des compétences et développements acquis sur la technologie de la matrice active. Elle serait susceptible de pérenniser une activité industrielle « visualisation » et au delà de développer notre propriété intellectuelle et notre potentiel scientifique grâce aux retombées économiques qui en découlent.

LES AFFICHEURS DE GRANDS FORMATS > 40''

Dans ce segment où les deux technologies majoritairement présentes sont le Plasma et la projection, il faut cependant noter :

- les techniques « murs d'images » pour les présentations de très grande taille, marché de niche réservé aux manifestations médiatiques ou aux salles de supervision (Synelec à Albi),
- le LCD en outsider possible, Samsung et LG prétendant déjà se positionner jusqu'à 54''. Les futures fonderies sur verre fonctionneront avec des dalles de 2 m². Pour développer le LCD sur ces marchés, de nouvelles techniques auront un rôle important à jouer comme le remplissage par goutte pour d'augmenter les cadences de production ou la mise en œuvre de nouveau conducteur pour réduire les temps d'adressage (cuivre par exemple)

Sur ce segment la technique dominante en rétro-projection TV est aujourd'hui le CRT.

Les techniques de projection resteront dominantes

Cependant, on considère que les techniques de projection à base de micro-display auront un rôle à jouer. Aujourd'hui les micro-display de types DMD ou LCD poly-silicium sont les plus utilisés. La technologie LCOS a un potentiel en terme de réduction des coûts par l'utilisation

d'un seul afficheur mais aussi grâce à son réel avantage en résolution. Elle pourrait s'imposer avec la mise en place des canaux TVHD (diffusion de la Chaîne « EURO 1080 » en 2004), le développement d'algorithmes de compression plus performants (MPEG4&7) ou de processeurs d'amélioration d'image. Pour le plus long terme, la projection LCOS semble bien adaptée au concept de cinéma électronique.

Dans les plus petits formats < 52'' correspondant aux parts de marché les plus importantes, le Plasma bénéficie d'un réel avantage en compacité par rapport aux techniques de rétro-projection. Cependant, certains Groupes travaillent sur de nouveaux concepts de rétro-projecteur « ultra-compact » de moins de 10 pouces de profondeur qui techniquement pourraient s'avérer concurrentiel. Matsushita a mis sur le marché un produit professionnel de 60'' pour ~ 23.000\$. Thomson aussi envisage des solutions compactes avec un coût raisonnable qui alors pourraient être appliquées aux produits « Grand Public ».

Position de la France

Sur le segment des grands formats >35'', bien qu'ayant quitté le secteur du Plasma, la France se positionne comme intégrateur de **système de projection** au travers de Thomson avec deux centres importants : le laboratoire R&D de Rennes et l'usine de production de rétro-projecteurs à Angers.

Pour le futur, le développement des systèmes de projection micro-display est une sorte de défi technologique avec à la clé entre autres la réduction du coût des composants (imageur, source, optique ...). Pour le relever la France, possède de **réels atouts** avec des capacités de fabrication à exploiter **dans le domaine des micro-displays** (plate-forme PEGS, ATMEL, Thales-LCD) ou des optiques de projection haute définition (Angénieux).

5.1.4 RECOMMANDATIONS EN VISUALISATION

Dans le domaine de la « visualisation », la France a accumulé de longue date un ensemble de capacités qui s'étendent de la recherche fondamentale à l'industrialisation de produits aussi bien à très large diffusion tels que TV grand public qu'à très forte technicité par exemple pour l'aéronautique.

Cependant non seulement en France mais aussi en Europe on a pu constater que malgré une activité précoce, importante et de renommée internationale tant au niveau recherche que développement dans le domaine LCD, on n'a pas su convertir ce potentiel pour générer de l'activité. La production est maintenant exclusivement localisée en Asie, région vers laquelle les investissements de l'ensemble des industriels mondiaux ont convergé. Cette situation laissant entrevoir à terme un risque de décentralisation de la recherche qui a tout à gagner de la proximité des moyens de production si on effectue un parallèle avec ce qui s'est récemment passé dans d'autres secteurs industriels ; malgré un contexte difficile, Alcatel a maintenu en Chine son centre de recherche, alors que son centre français subit quant à lui les conséquences de l'effondrement du marché des télécommunications.

Or, le prix de la main d'oeuvre à elle seule ne peut expliquer ce phénomène de décentralisation, en partie compte tenu de la technicité nécessaire. Pour preuve, le fait que dans le domaine de la micro-électronique, où les investissements nécessaires sont équivalents, un tel développement (ST à Crolles par exemple) a permis avec succès un retour en France d'une activité de production de circuits intégrés.

*Face à ces constatations, à la situation de la France qui comporte un grand nombre d'acteurs PME et Groupes industriels, des moyens technologiques mutualisés au sein de plate-formes et grâce au niveau des recherches et études amonts menées dans l'ensemble des Laboratoires publics ou privés, **il apparaît que nous avons sur le plan national en main un grand nombre d'atouts pour accroître notre activité économique ainsi que notre propriété intellectuelle dans le domaine visualisation.***

Les prochaines évolutions, dans les technologies ou les produits, que nous avons détaillées dans ce bilan, constituent un terrain propice à la réussite de ce redéploiement. Certains pays l'ont d'ailleurs compris comme en témoignent les mesures d'accompagnement prises par les ministères allemand, américain, ... pour supporter de grands programmes de recherches ou d'investissements en équipement industriels.

De manière plus spécifique, les axes qui ressortent plus nettement de ces analyses sont relatifs aux technologies micro-display et OLED :

- €# *Dans le domaine micro-display, la France dispose de réels atouts avec des capacités de design et fabrication à exploiter: matrices actives a-Si, Si-poly, Si mono, assemblage de cellules cristal liquide, éclairage ... ou des optiques de projection haute définition. Il s'agit de points forts nécessaires pour assurer le développement des systèmes de projection d'images sur le segment des produits pour les grand formats d'images ou pour des applications à plus long terme telles que la réalité virtuelle ou vision tri-dimensionnelle.*
- €# *Dans le domaine OLED et compte tenu du contexte international effervescent, il paraît judicieux et essentiel de soutenir :*

- soutenir un axe de recherche pour l'efficacité en puissance des écrans OLED pour bénéficier de leur principal avantage de faible consommation par rapport aux écrans LCD,
- tirer profit de nos compétences et moyens en technologie matrice active sur silicium en la valorisant sur les OLED,
- favoriser la mise en place de moyens pour accélérer le développement de cette technologie vers les grandes tailles nécessaires pour des applications à large diffusion, TV par exemple.

*Après la rupture technologique du LCD et maintenant la poussée de l'OLED, **les premiers frémissements d'une technologie d'écrans souples ou plastiques** se font sentir. Ils pourraient annoncer les prémices d'une véritable révolution technologique, que certains nomme « l'Ere de la matière molle ».*

*Notre positionnement national sur les prochaines évolutions du domaine de la visualisation dépendra bien sûr de notre capacité à **associer dès le stade de la recherche des communautés scientifiques très différentes** : opticiens, physiciens et chimistes. Mais il est aussi important de mettre un accent pour **soutenir les actions de transfert industriel** et d'investissement, tant vers les PME, que vers les grands Groupes.*

*Dans le contexte industriel actuel, les actions doivent être menées non seulement en **concertation entre la recherche et l'industrie** mais aussi en **complémentarité avec nos partenaires européens**, beaucoup d'entreprises étant aujourd'hui multi-domestiques.*

5.2 Holographie

L'holographie, cette technique d'enregistrement optique, basée sur des principes très largement étudiés dès les années 1950 et initialement ciblée vers des applications de microscopie, s'est jusqu'à très récemment cantonnée à des applications à vocation « artistiques » pour la présentation d'images tri-dimensionnelles. Ce domaine de l'optique longtemps en quête de perspectives de marché a vu émerger depuis les années 1995 de réels domaines d'applications avec :

- l'exploitation des techniques d'holographie image au marché de la sécurité,
- la mise à profit de l'holographie temps réel et de l'holographie numérique pour le contrôle industriel plus largement détaillée dans le thème 7,
- l'utilisation des matériaux holographiques dans les projets amonts de stockage très haute densité.

Les conclusions présentées sur ce domaine sont basées sur les analyses détaillées, dans le domaine de l'holographie image (J. L. Tribillon), des matériaux (C. Carré Morlet-Savary) et de l'holographie numérique (P. Picart) qui figurent au tome II.

5.2.1 Holographie image¹⁴

L'hologramme image, voie naturelle de l'holographie, permet la visualisation du vrai relief. Il conserve toutes les données qui le caractérisent, à savoir : la profondeur de champ et la parallaxe. Parmi les nombreuses techniques d'enregistrement existantes, nous résumerons leur positionnement actuel par rapport à leur potentiel d'applications :

- *l'Hologramme laser en transmission* n'est utilisé que comme hologramme primaire pour la réalisation de certains « masters » destinés ensuite à la production des composants holographiques pressés.
- *l'Hologramme lumière blanche en transmission ou en réflexion* permet de présenter une image très brillante, visible avec une source blanche et sans irisation. Les plus grands hologrammes ont été réalisés en France par Holo-Laser. Les applications premières ont été la communication et la publicité, un marché trop étroit pour être pérenne, mais cette technique sert aussi de base à la réalisation des hologrammes pressés ou des hologrammes de volume (fonctionnant sur l'effet Bragg) répliqués optiquement dans les photopolymères, récemment commercialisés et bénéficiant d'un procédé de traitement à sec.
- *Le Stéréogramme (ou hologramme multiplex)* permet l'illusion d'un objet tridimensionnel restitué à l'intérieur du cylindre sur lequel est placé le film contenant un ensemble d'hologrammes multiplexés, mais n'est plus fabriqué.
- *l'Hologramme pressé* est obtenu par la répllication dans des matériaux plastiques du profil de relief de la matrice holographique. Suivant les procédés techniques employés, ces hologrammes peuvent être pré-encollés ou déposés directement sur le substrat final par transfert à chaud sur plastique ou papier. La France a joué un rôle pionnier avec Holo-Laser. Des dizaines de millions d'hologrammes de ce type ont été commercialisés, citons l'exemple de la colombe sur les cartes de crédit. Jusqu'à aujourd'hui les hologrammes pressés utilisés fonctionnent dans le visible. Pour le futur on pourrait imaginer des hologrammes codés, des hologrammes lisibles à d'autres longueurs d'onde, ...

¹⁴ Détaillé au Tome II dans le rapport de J.L. Tribillon

- l'*Hologramme couleur*, malgré de nombreuses méthodes investiguées, reste de qualité limitée, hormis les résultats obtenus par interférométrie holographique trichromatique en temps réel (Collaboration ISL-ONERA-DGA) qui donne accès à une méthode de contrôle de très grande précision absolue.

Pour un marché mondial de l'industrie holographique d'1 milliard de \$ en 2001, une croissance annuelle de 23% a été estimée par certains analystes¹⁵. Ce marché concerne pour environ 20% l'emballage et des parts égales à 8% pour le « Display-Art », la publicité et l'industrie de l'optique. Par contre les nouveaux secteurs qui se sont développés depuis 1996, pour la sécurité et « Brand protection », correspondent à environ 60% des revenus. Aujourd'hui deux techniques peuvent être considérées comme industrielles :

- les techniques de production par pressage à partir d'un « master » sont maintenant industrielles, des dizaines de millions d'hologrammes de ce type ont déjà été fabriqués et commercialisés. Citons en France, une petite société, Hologramme Industrie, qui se positionne parmi les cinq premiers mondiaux.
- les techniques d'enregistrement par réplication optique ou inscription directe d'hologrammes de volume dans les photopolymères ont fait plus récemment leur apparition sur le marché de la sécurité. A titre d'exemples citons, les «stickers » de Dai Nippon pour la protection des grandes marques, la production d'éléments sécuritaires personnalisés comme ceux mis en œuvre dans le nouveau passeport allemand avec HSM et enfin l'annonce Thales pour une carte d'identité utilisant ces nouvelles sécurités holographiques.

Cette dernière technique, très récente accroît le degré de sécurité. Elle est certainement amenée à se développer en exploitant les nouvelles techniques de codage optique en phase ou polarisation et de traitement d'images pour se protéger contre la contre-façon, mais dépend d'une situation de monopole dans le domaine des matériaux photopolymères détenues par DuPont.

5.2.2 Matériaux d'enregistrement holographique¹⁶

Le premier matériau utilisé pour l'enregistrement d'hologrammes était l'émulsion argentique, avec les plaques à très haute résolution commercialisées par Agfa-Geavert, Ilford ou Kodak qui ont stoppé leur production depuis quelques années, suite aux évolutions de la spectroscopie. La palette des matériaux se répartit maintenant entre trois familles :

- les *Gélatines argentiques*, dédiées uniquement à l'holographie sont désormais l'apanage de quelques scientifiques dans le monde ayant acquis le savoir faire des procédés « Slavitch ». Les *Gélatines bichromatées*, bien que maîtrisées au stade industriel nécessitent des moyens sophistiqués pour garantir les performances. Elles sont soit utilisées par des laboratoires ayant acquis la maîtrise du procédé pour la validation de nouveaux concepts, soit destinées à des marchés de niche (en tant que composant optique pour les visualisations avioniques « tête haute » de Thales-Avionics).
- les *matériaux dynamiques* (cristaux photo-réfractifs ou photo-thermoplastiques) ont été intégrés dans certains outils de contrôle pour des applications spécifiques telles que l'interférométrie holographique, marché de la « caméra holographique » qui reste à très faible diffusion.

¹⁵ Holographic News, novembre 2001

¹⁶ Rapport détaillé de C. Carré Morlet-Savary au Tome II

- les *photopolymères*, se scindent en plusieurs catégories selon leur nature chimique. Les *photorésists* commercialisés entre autre pour la production d'hologrammes pressés sont les plus connus. Les *systèmes photo-polymérisables tout organique*, matériaux faciles d'emploi, bon marché, stables à l'humidité donnent des rendements de diffraction élevés. Depuis une vingtaine d'années, plusieurs laboratoires mondiaux (Mulhouse, en France) ont investi beaucoup d'efforts dans ces matériaux mais seul DuPont a percé au niveau industriel. Les *polymères dopés par un photo-sensibilisateur* sont principalement étudiés et développés pour les applications de stockage optique haute densité, tel que le PMMA qui a l'avantage d'un process à sec par rapport aux autres systèmes à base d'alcool polyvinylique ou de polyvinylcarbazole. Enfin les *systèmes organo-minéraux sol-gels* constituent une voie récente de matériaux auto-développant, qui repoussent les limites en résolution spatiale, stabilité thermique et mécanique intrinsèques aux matériaux photopolymères tout organiques. Des efficacités de 80% ont été démontrées. Les principaux acteurs sont l'industriel Dai Nippon Printing et les équipes universitaires, avec en particulier une approche originale de matériau hybride qui est en cours d'étude à Mulhouse.

Le développement et la mise en œuvre industrielle de ces nouveaux matériaux nécessite une bonne compréhension de l'ensemble des processus physico-chimiques pour identifier les propriétés permettant des interactions efficaces de l'optique avec la nature chimique des composés. Elle correspond non seulement à un travail fondamental incontournable pour parvenir à l'optimisation des matériaux, mais aussi nécessite d'établir un dialogue entre des communautés scientifiques très différentes, opticiens et chimistes ainsi que chercheurs et industriels pour favoriser leur développement et leurs applications. Ceci explique que malgré l'importance de l'effort de recherche dans le domaine des matériaux photosensibles, et la France en est un exemple, les développements aient été rares. La production industrielle de film photopolymère n'a aboutit que chez DuPont (US) lui conférant aujourd'hui une situation de monopole.

5.2.3 Holographie numérique¹⁷

Les techniques d'holographie numérique utilisant un détecteur matriciel se sont concrétisées au début des années 1990 avec les avancées technologiques liées aux capteurs d'images à couplage de charges (CCD). Ces dernières années, de nombreuses possibilités liées à cette technique ont été démontrées y compris en France: imagerie par polarisation ou par contraste de phase, imagerie à travers les milieux diffusants (Laboratoire Kastler Brossel), microscopie 3D, imagerie par synthèse d'ouverture (Thales Research & Technology), compensation des aberrations, multiplexage spatial et intégration temporelle (LAUM).

Bien qu'étant principalement une technique de contrôle, l'holographie numérique est également une nouvelle solution présentant l'avantage de se combiner au traitement numérique permettant d'envisager de nouvelles solutions d'imagerie, de reconnaissance d'objets 3D ou de codage sécurisé d'images, comme en témoignent les travaux récents menés au BIAS en Allemagne ou à Connecticut University (US). Pour les applications de codage d'images et de visualisation tri-dimensionnelle, l'holographie numérique souffre d'un manque de résolution spatiale imposé par l'état de l'art de la technologie CCD. Pour fixer les ordres de grandeurs, avec une matrice 1360×1024 et des pixels de taille $4,6 \times 4,6$ microns², le diamètre maximum enregistrable est de l'ordre de 45 mm à 1 mètre. A l'heure actuelle, les applications sont donc limitées à des objets de petites dimensions.

¹⁷ Rapport détaillé de P. Picart au Tome II

La France n'est pas absente de ce domaine en plein essor puisqu'on recense six équipes à la pointe de cette spécialité. Toutefois, l'effort est porté sur les potentialités de l'holographie numérique pour le contrôle et la mesure.

5.2.4 Recommandations en holographie

Dans le domaine de l'« holographie », l'analyse de la position française et des domaines d'applications de ces techniques permettent de mettre en valeur des axes d'études à renforcer dès aujourd'hui autour de la sécurité et à privilégier pour le long terme autour du stockage haute densité ou la visualisation. Il apparaît donc important de :

*- **développer le secteur des matériaux à haute résolution** pour atteindre un niveau industriel à partir des compétences existantes en photochimie et polymère afin d'assurer une autonomie par rapport au monopole US de DuPont. Grâce à la richesse de l'ingénierie moléculaire, la facilité de mise en forme des **matériaux organiques**, la flexibilité des compositions chimiques et des approches hybrides sol-gels, il est aujourd'hui possible de synthétiser des matériaux pour atteindre des propriétés optiques particulières. Les **approches sol-gel** présentent de multiples applications à la fois en tant que matériaux photosensibles ou pour les techniques de moulage. Ils bénéficient de meilleures propriétés thermo-mécaniques que les polymères et ont démontré leur réalité industrielle dans le domaine des couches minces.*

*- **favoriser et accompagner le transfert technologique** entre les acteurs scientifiques et industriels pour bénéficier de retombées économiques des travaux de pointe menés en France ces dernières décennies sur les matériaux, les techniques holographiques et les méthodes de codage de l'information. Il faut pour cela mettre en place des programmes visant :*

- à soutenir le développement des **composants pour la sécurité** pour asseoir un meilleur positionnement mondial.*
- à préparer les **futures générations de stockage**, au delà du DVD bleu, à l'instar des consortiums américains et asiatiques qui se constituent entre grands acteurs industriels et PME pour les matériaux (IBM, SONY, InPhase, Lucent Technologies, Aprilis...). Aucun système ne s'impose à l'heure actuelle et le stockage holographique se présente comme une solution prometteuse.*

*- **maintenir une veille technologique en holographie numérique**, pour les applications codage d'images et visualisation 3D. Si cette nouvelle technique souffre encore d'un manque de résolution spatiale imposé par l'état de l'art de la technologie CCD qui limite les applications à des objets de petites dimensions, il faut en valider les principes. L'effort de développement doit donc porter sur la mise en œuvre de grandes matrices de tailles supérieures à 2000 Δ 2000 pixels et des pixels de l'ordre du micron. Il pourrait être tiré par le marché de la photo numérique et permettrait d'envisager des retombées dans le **domaine de l'image 3D**.*

5.3 Traitement optique de l'image¹⁸

5.3.1 Introduction

Les bases du traitement optique de l'image ont été établies par les travaux de Maréchal et de Duffieux autour des années 1950. Les avantages de l'optique mis en avant pour ces processeurs sont le traitement parallèle de l'image et la vitesse du traitement, grâce aux propriétés de transformée de Fourier d'une lentille en lumière cohérente, qui permettent de réaliser des opérations complexes telles que les corrélations d'images à la vitesse de la lumière. Cependant, c'est le développement de modulateurs pour des applications comme les vidéo projecteurs qui a permis aux travaux de recherches très nombreux sur les processeurs optiques de reconnaissance de formes de vraiment démarrer au cours des 15 dernières années.

5.3.2. Evolution durant les 15 dernières années

Cette période a vu un essor sans précédent des processeurs optiques pour le traitement d'images, comme le montrent les très nombreux résultats scientifiques dans le domaine. Il faut noter que durant cette période, les recherches ont été menées dans plusieurs directions:

- développement de nouveaux composants électro-optiques tels que des modulateurs spatiaux de lumière de plus en plus performants et adaptés, et des détecteurs.
- développement de nouveaux algorithmes et de filtres pour les processeurs de reconnaissance de forme.
- optimisation des architectures en particulier l'architecture du corrélateur à transformée conjointe.
- développement de nouvelles architectures: réseaux de neurones optiques, corrélateur avec disque optique, transformée par ondelettes, transformée optique de Hough, ...
- réalisation de corrélateurs optiques compacts.

En France, durant les 20 dernières années, presque tous les laboratoires en optique et traitement d'images ont mené à un moment ou à un autre des recherches dans le domaine du traitement optique de l'image ou du signal. Ce fut d'ailleurs aussi le cas à l'étranger. Devant le nombre très important de travaux, on se contentera d'en citer juste quelques-uns :

- Thales Research & Technology: très nombreux travaux touchant tous les aspects des processeurs optiques, réalisation d'un corrélateur optique compact.
- ENST Bretagne: réalisation d'un corrélateur optique embarqué pour la reconnaissance de panneaux routiers
- IOTA: processeurs optiques, réseaux de neurones optiques, mémoires optiques
- Institut Franco-Allemand de Saint Louis (ISL): analyse de particules par processeur optique.

En conclusion, après près de 20 ans de recherches, même si les processeurs optiques pour le traitement d'images ont atteint une certaine maturité et un point culminant en termes d'activité de recherche, ils n'ont pas connu l'essor industriel espéré, la compétition avec les processeurs numériques étant très rude. Cependant, ces travaux sur le traitement optique ont permis de multiples retombées positives pour le développement d'algorithmes et de nouvelles méthodes d'imagerie.

¹⁸ rapport détaillé de P. Ambs sur le « Traitement optique de l'image » au Tome II

5.3.3. Situation actuelle

Il apparaît donc, vu les progrès réalisés par les processeurs numériques électroniques, que la cadence vidéo imposée par les modulateurs à cristaux liquides nématiques n'est plus suffisante. Pour redevenir compétitive de nouvelles approches sont étudiées, principalement dans les laboratoires : les modulateurs à base de cristaux liquides ferro-électriques, les approches d'architecture multi-canaux ou le couplage d'un corrélateur optique avec une mémoire optique à accès parallèle... La mise au point récente par deux sociétés américaines de telles mémoires basées sur un disque optique holographique facilitera ce genre d'approche.

Deux évènements récents, (la session "Optical Information Systems" du SPIE et le numéro spécial d'Applied Optics, en août 2003) traduisent l'évolution des thématiques de recherche dans ce domaine et permettent en particulier de retenir trois axes majeurs: les algorithmes, les architectures multi-parallèles et l'émergence de nouvelles applications en particulier pour le cryptage et la sécurité ou pour l'imagerie multi-spectrale et polarimétrique, ...

5.3.4 Perspectives en traitement optique de l'image

Le domaine de recherche consacré au traitement optique de l'image a considérablement évolué et gagné en maturité au cours des quinze dernières années, passant de montages expérimentaux à des processeurs optiques qui ont fait l'objet de commercialisation. Cependant ces processeurs n'ont pas eu la diffusion espérée, la capacité des processeurs électroniques s'étant rapidement développée, ceux-ci effectuant maintenant certains traitements d'image à la cadence vidéo.

Les limites du domaine consacré au traitement optique de l'image sont devenues beaucoup plus larges et il est réducteur de le cantonner au processeur optique de reconnaissance de forme. Il vaudrait mieux cerner ces activités en parlant de **traitement optique de l'information** ou d'**optique de l'information** ("Information Optics", comme le fait le journal Applied Optics dans son numéro mensuel intitulé "Information Processing").

Dans le futur, il sera important de cibler les applications susceptibles de bénéficier d'un apport de l'optique et de proposer de nouvelles **architectures hybrides** associant un traitement optique avec un traitement électronique.

En conclusion le domaine de recherche du traitement optique de l'information reste un domaine de recherche très actif et bien identifié au niveau mondial, il convient donc d'y rester présent et de le développer, en particulier en élargissant les recherches aux domaines connexes afin de ne pas manquer les opportunités actuelles et futures dues en particulier aux progrès technologiques et aux développements de nouvelles applications. *Les nouvelles tendances concernent en particulier le secteur biomédical avec l'imagerie tri-dimensionnelle, la défense avec les nouveaux moyens d'imagerie multi-spectrale, le multimédia pour l'accès aux données des nouvelles techniques de stockage ou les techniques de cryptage d'image par la phase appliquées au domaine de la sécurité.*

5.4 Eclairage¹⁹

L'éclairage est un secteur important des applications de l'optique et joue un rôle fondamental dans le domaine de la visualisation avec le développement récent des technologies non émissives telles que le LCD nécessitant un rétro-éclairage ou avec l'utilisation de LED dans les grands panneaux d'affichage ou de signalisation. Ce secteur représente un marché important avec un grand chiffre d'affaire pour lequel le marché automobile des phares de voiture représente environ 12 milliards d'€ en 2002 dont 15% pour les LED ²⁰).

Peu de grandes entreprises sont présentes en France (*Philips éclairage, Schneider Electric* ainsi que *Valeo* pour l'automobile) mais on note un nombre important de PME de 40 à 200 personnes qui fabriquent des systèmes et réalisent des études pour l'éclairage (*SEAE, Legrand, B2M...*) ou l'utilisation des nouvelles technologies à base de LED (*PHLOX, Polytec PI ...*).

Le marché de l'éclairage se divise en plusieurs secteurs. Il faut distinguer principalement:

L'éclairage extérieur public et privé

- La signalisation lumineuse tricolore,
- L'éclairage des grands espaces, stades, parkings,
- L'illumination : site, monuments, événement.

Les clients sont les villes, les Directions Départementales de l'Équipement(DDE), les grandes entreprises comme la SNCF...

L'éclairage médical et dentaire

- les éclairages pour les cabinets dentaires,
- les éclairages médicaux endoscopiques...

Les éclairages particuliers

- les tables lumineuses,
- stations de contrôles des professionnels des arts graphiques...

L'éclairage automobile

Dans tous ces secteurs et en dehors des aspects sources, on trouve des fabricants français, mais les matériels du domaine médical et dentaire sont essentiellement étrangers à l'exception d'Angenieux.

¹⁹ Synthèse réalisée par J.P. Goure

²⁰ Laser Focus World, sept. 2003

5.5 Energie à base de composants photovoltaïques ²¹

5.5.1 - Evolution du domaine

Le secteur des composants opto-électroniques qui se développe le plus rapidement est sans conteste, celui du photovoltaïque pour une production d'électricité basée sur la conversion de la lumière du soleil.

La production industrielle mondiale est en plein essor avec plus de 30% de croissance en moyenne du marché par an depuis 5 ans et les prévisions à l'horizon 2010 prévoient une multiplication par 20 de la production.

Pour le moment, plus de 85% des cellules sont à base de silicium cristallin, qui est la voie la plus avancée sur le plan technologique et industriel. Le silicium est l'un des éléments les plus abondants sur terre, parfaitement stable et non toxique. A l'avenir d'autres matériaux, au stade pré-industriel ou encore au niveau de la recherche et même au niveau de la validation des concepts, viendront contribuer à la stimulation de ce marché très prometteur. En particulier l'utilisation de matériaux à base de polymères constituent une filière qui fait l'objet de nombreux travaux amonts.

5.5.2 Champs d'application et marché

Les applications du photovoltaïque couvrent tous les types de demandes énergétiques tels que: pour les sites isolés, l'alimentation en électricité des relais de communications, balises, les dispositifs de sécurité et autres systèmes par le biais d'un stockage sur batteries; les besoins des pays en voie de développement (pompage de l'eau, éclairage, réfrigération) et pour les pays développés, la production d'une électricité décentralisée (essentiellement sous forme de toits photovoltaïques connectés aux réseaux plutôt que des centrales).

L'industrie japonaise est la première du monde avec près de 50 % de la production mondiale en 2002, distançant l'Europe et les États-Unis, ex-leader du secteur. Le centre névralgique du photovoltaïque mondial se situe dorénavant au Japon dans la région d'Osaka

5.5.3 Etat de l'art et évolutions des recherches

Malgré l'immense chemin parcouru, l'électricité solaire n'a pas encore franchi le seuil lui permettant d'être compétitif par rapport aux autres sources de production d'électricité. Il reste encore des verrous technologiques à lever relatifs à la fabrication des cellules solaires trop gourmandes en énergie et à l'environnement car la plupart des procédés actuels nécessitent l'usage de produits chimiques et de gaz extrêmement toxiques.

Pour les cellules à base de plaquettes en silicium cristallin (85 % du marché mondial) et dont les rendements industriels dépassent souvent les 16 % sur de grandes surfaces, l'avenir passe par une réduction drastique des coûts.

²¹ Voir le rapport détaillé de J.C. Muller au tome II

Pour les cellules en couches minces (dont le Si amorphe qui représente 10 % du marché avec des rendements de 6-8 %), l'objectif majeur reste l'augmentation des rendements de conversion sur le silicium ainsi que sur les matériaux composés de chalcogénures (CIGS). Pour les cellules du futur à semi-conducteurs organiques (avec 3% de rendement en début de vie) ou à base de matériaux nano-structurés une recherche fondamentale de base s'avère nécessaire.

5.5.4 Position de la France et recommandations pour l'énergie photovoltaïque

Les différents programmes, nationaux (ADEME-CNRS-CEA) en partenariat avec l'industrie photovoltaïque et européens, de la DG Recherche ont permis de maintenir la recherche française au niveau mondial. Les réflexions en cours au niveau du GAT « Cellules photovoltaïques du futur » du Programme Energie du CNRS avec les industriels du domaine (PHOTOWATT dans les 10 premiers mondiaux avec 20 MW, EMIX pour un nouveau matériau et SOLEMS et FEE pour l'amorphe) ont permis de recommander les objectifs prioritaires suivants :

- *Rendre moins chères et plus efficaces les **technologies existantes** à base de plaquettes en silicium cristallin (dites de 1ère génération). L'enjeu sera d'obtenir des rendements de conversion des cellules de l'ordre de 18 à 20 % avec un coût du module inférieur à 1 €/W en utilisant efficacement les matières premières dans des procédés mettant l'accent sur des plaques minces. Ceci s'effectuera dans le cadre d'un programme national ADEME-CEA-CNRS et les Industriels du photovoltaïque autour d'une plate-forme technologique au CEA.*
- ***Développer industriellement les filières de 2ème génération** à base de cellules en couches minces (10 % du marché) par la mise au point de procédés à haut débit et haut rendements (12-15 %) sur de grandes surfaces, soit par cristallogénèse de gros grains ou par transfert d'un film de silicium, soit par des dépôts à basse température de silicium amorphe/polymorphe ou de chalcogénures (dont le développement industriel est prévu sur la future plate-forme CISEL du projet ADEME-CNRS-EDF-St GOBAIN). Les objectifs fixés avec les industriels, sont le développement de nouvelles structures tandem et de modules de grandes tailles.*
- ***Prospecter de nouveaux matériaux en couches minces** à très faibles coûts tels que les organiques (rendement actuel faible de 3 %) à base de polymères (dérivés des fullerènes) ou de cristaux liquides en films ou réseaux interpénétrés, et développer de nouveaux concepts permettant de jeter les bases d'une future percée technologique en dépassant les limites des rendements actuels avec des nouveaux matériaux composites dont la matrices hôte est modifiée par l'incorporation de nanocristallites favorisant une conversion par multi-photons ou par luminescence.*

Chapitre 6

SECURITE ET DEFENSE

Introduction

La place de l'optique dans les domaines de la sécurité et de la défense est par nature diffusante. En revanche, à l'opposé de ce qui est observé dans le domaine de la physique où elle tient une place parfois difficilement identifiable, il convient de remarquer que cette discipline appliquée au domaine de la défense se décline sous le terme générique d'optronique (optique + défense = optronique) ⁽¹⁾.

L'industrie européenne est fortement présente dans ce secteur et elle occupe une place de premier rang au niveau mondial. La France est bien représentée avec des acteurs industriels parmi les leaders au niveau européen et fort bien placée sur le plan international.

Cette technologie a le mérite de s'intégrer dans les systèmes d'armes ce qui nécessite la prise en compte de ses spécificités dans le montage d'une infrastructure. Elle présente à elle seule un caractère multidisciplinaire en faisant appel à des compétences et à des connaissances variées (mécanique de précision, circuits électroniques et automatismes, traitement du signal et des images (incluant les notions de temps réel)). Enfin, elle tient une place importante dans un système d'arme par son aide à la décision. D'où le réflexe de toujours se poser la question : « Que peut faire l'optronique ? », lorsque l'on doit traiter un problème ou réaliser une fonction.

Les principaux facteurs qui gouvernent le développement de l'optronique sont naturellement liés aux besoins opérationnels qui sont représentés par :

- . une aide à la décision à partir de l'observation et de la veille (capteurs pour imagerie visible, IR). Ces capteurs peuvent être embarqués sur des porteurs variés (véhicules terrestres, aéronefs, satellite). La protection et l'efficacité du fantassin sont également étroitement dépendantes de la mise en œuvre de tels capteurs en y intégrant l'aspect vision nocturne,
- . une aide à la conduite de tir et au guidage des armes (désignation laser : POD laser ..., autodirecteurs de missiles),
- . une neutralisation quasi-instantanée d'une menace (CMO, futures armes laser ...).

(1) **OPTRONIQUE** : Utilisation de l'OPTOELECTRONIQUE à des fins militaires. *Système complexe de surveillance, de détection et de poursuite des cibles ou de guidage d'engins.*
Grand Dictionnaire Encyclopédique LAROUSSE.

Le premier facteur impose de pouvoir disposer de **capteurs** dédiés spécifiques en fonction du type d'emport. Par exemple, au niveau du fantassin on va privilégier le faible encombrement, la masse réduite et une faible consommation électrique. En revanche, sur un aéronef, on va privilégier la portée afin d'assurer une distance de sécurité au système d'emport tout en disposant d'une haute résolution au niveau d'une fonction imagerie.

Le second passe par un accroissement des **énergies** pouvant être délivrées par les sources laser, afin d'accroître les portées, tout en garantissant un caractère de sécurité oculaire au niveau des servants.

Enfin, le dernier facteur impose l'emploi de **sources accordables** dans le MIR et le LIR opérant en régime de cadence élevée. Dans le futur, le concept d'arme laser de moyenne énergie viendra enrichir la panoplie du champ couvert par l'optronique.

Dans le domaine de la sécurité on peut considérer que les opérations d'identification ou de lutte contre les contre-façons peuvent être intégrées à l'optronique. Ainsi, l'optronique est employée pour assurer les missions :

- . d'identification anthropométrique (biométrie ...),
- . de durcissement vis-à-vis de la falsification,
- . de sécurité routière (équipement de gendarmerie : télémétrie, caméras thermiques),
- . d'aide au pilotage d'hélicoptères (détection d'obstacles, ex. : lignes haute-tension)
- . de police des mers et de sécurité maritime,
- . de sécurité civile (surveillance incendie, pollution industrielle ...),
- . de sécurité aéroportuaire (incluant la frontière de Schengen de notre ressort),
- . de protection de zones sensibles (bâtiment, site),
- . de lutte contre le pillage du patrimoine culturel,
- . de se prémunir contre la fabrication et la diffusion d'une fausse monnaie par des états voyous.

et plus généralement de lutte ou de prévention contre la menée d'actions terroristes.

Les techniques qui exploitent les propriétés quantiques d'une onde optique cohérente ou de sa génération (source à un photon) participent également à l'aspect sécuritaire au niveau de la transmission de données. La cryptographie quantique couvre ce domaine et les récentes démonstrations expérimentales peuvent à terme conforter la voie optique bien que d'autres techniques exploitant les outils mathématiques et numériques lui sont opposées.

Pour ces applications, certains facteurs contribuent à limiter l'utilisation d'équipements optroniques qui sont représentés par :

- . les coûts de possession ou/et d'entretien,
- . leur diffusion qui se doit de répondre aux critères réglementaires imposés par les décrets sur l'exploitation de matériels de défense.

A ce stade, on doit noter que la pression économique et la concurrence de pays moins déterminés peuvent contribuer à réviser cette réglementation.

Par ailleurs, les techniques mises en œuvre peuvent être complémentaires à celles qui consistent à exploiter les systèmes d'analyse et de stockage de données numériques. En règle

générale, le domaine de la sécurité est très concurrentiel en termes d'offre technologique et l'optique est souvent associée à d'autres techniques ou à des processus physiques intermédiaires.

Par exemple, la détection de composés chimiques par prélèvement in-situ peut utiliser :

- . la colorimétrie réactive
- . la spectroscopie d'absorption ou d'excitation,
- . les ondes acoustiques de surface associées aux matériaux à empreinte moléculaire,
- . le nez électronique ...

Ces techniques peuvent être étendues au domaine biologique avec l'emploi :

- . de matériaux à empreintes génétiques,
- . de la spectrométrie d'un signal de fluorescence induite par voie UV,
- . des propriétés des plasmons de surface ...

Tout l'art consiste alors pour l'industriel à mesurer la pertinence de la technique à développer pour satisfaire aux critères de sensibilité, de sélectivité, d'activation (effets de saturation), de compacité et de coûts.

Aujourd'hui, le domaine de la défense et les applications civiles s'enrichissent mutuellement des avancées technologiques. A titre d'exemple, il en est ainsi au niveau des processeurs numériques et des systèmes informatiques mais dans le domaine de l'optronique on peut noter l'impact que peuvent présenter les capteurs IR pour les applications civiles. En effet, le développement de systèmes IR non refroidis doit permettre l'insertion de tels senseurs dans les domaines de l'automobile (aide à la conduite par temps de brouillard), de l'énergie (contrôle de fuite ou d'isolation thermique), de l'industrie (contrôle pollution / condensation, conduite de procédés ...) et de la sécurité civile (détection incendie). On doit cependant noter que mis à part quelques exemples, cette démarche qui consiste à mettre en avant le caractère dual ne jouit pas d'une généralisation au niveau de l'optronique.

Les domaines technologiques sur lesquels s'appuie l'optronique sont :

- . les matériaux pour l'optique (du massif au micro/nano-structuré),
- . les procédés d'élaboration (du four pour les matériaux massifs à l'épitanie pour les matériaux semiconducteurs),
- . la mise en œuvre (couplage avec la microélectronique (exemple : circuits de lecture)),
- . la caractérisation des composants et la validation des fonctions,
- . le traitement du signal et de l'image,
- . les servomécanismes et l'inertie.

A cela, il convient d'ajouter le domaine du laser avec les technologies spécifiques (matériaux, miroirs et revêtements multi-diélectriques, excitation, gestion thermique ...) et les interactions spécifiques lumière-matière ainsi que leurs emplois, liés à une bonne connaissance de la propagation dans l'atmosphère.

Enfin, la métrologie au sens de capteurs mesurant les paramètres physiques d'environnement (dont la météorologie) ou de suivi d'évolution de structures (par capteurs intégrés) exploite les propriétés de l'optique en général et du laser en particulier.

Notons que la physique fondamentale représentée par le refroidissement d'atomes par voie laser et la réalisation de condensats de Bose-Einstein en laboratoire suscite un intérêt. En effet, la gyrométrie à onde de matière peut être envisagée comme un substitut aux gyrolaser conventionnels avec un gain en sensibilité de plusieurs ordres de grandeur en inertie. Il en va de même pour ce qui est de l'accélérométrie. Cependant, ceci ne pourra sérieusement déboucher si :

- . le besoin existe,
- . il est concevable de réaliser une miniaturisation du système,
- . le concept présente une robustesse vis-à-vis de son environnement.

Toujours est-il que l'optronique est ouverte à l'intégration des concepts les plus avancés, dans tous les domaines allant de la physique à la chimie en passant par la science des matériaux, afin de réaliser de nouvelles fonctionnalités.

Optronique passive / Optronique active

Généralement, on définit deux classes de systèmes optroniques. Les systèmes passifs et les systèmes actifs. Dans le premier cas, on ne fait qu'observer une scène ou analyser la transmission à l'aide d'un capteur alors que dans le second cas, on utilise un rayonnement lumineux (généralement représenté par une émission laser) pour illuminer une scène ou un objectif.

A titre d'exemple, l'optronique passive est utilisée :

- . pour la détection de substances chimiques ou aérosolaires,
- . en veille panoramique IR,
- . en imagerie (mono ou multi-spectrale ...),

alors que l'optronique active concerne les actions :

- . de détection d'optique pointée,
- . d'imagerie par balayage de faisceau ou par flash,
- . de désignation d'objectif,
- . de contre-mesures ...

La grande diversité des applications de l'optique dans le domaine de la défense rend l'optronique incontournable dans la définition et la réalisation d'un système d'arme.

Ainsi, dans le cadre du programme FELIN (Fantassin à Equipement & Liaison INTégrés) la place de l'optronique est représentée par l'intégration des fonctions :

- . conduite de tir déportée,
- . amélioration de la furtivité visuelle et IR,
- . télémétrie intégrée,
- . protection contre la menace laser,
- . aide à l'identification au combat,
- . vision nocturne ...

Cette panoplie technologique intégrée à l'équipement du fantassin a pour objectif de rendre plus efficace son action et de répondre ainsi à la réduction des effectifs opérationnels liés à la disparition des obligations citoyennes (conscription) du service national.

On ne doit pas oublier que ces fonctions entrent dans la constitution d'un système fonctionnel qui peut faire appel à divers types de capteurs ou à différentes techniques (émission et détection électromagnétique, guidage inertiel ou GPS ...). Ainsi, l'optronique doit s'insérer dans des systèmes complexes « infocentrés », exploités dans le cadre d'engagements coopératifs tout en cultivant la maîtrise des effets terminaux.

Cette instrumentation du fantassin doit prendre en compte ses possibilités d'emport, le caractère ergonomique de l'équipement tout en conservant les critères de mobilité requis et en assurant une autonomie adaptée à la mission. De ce point de vue, l'instrumentation des forces spéciales nécessite de pouvoir disposer d'une totale autonomie énergétique, sur un laps de temps plus ou moins important, ce qui a un impact sur la définition et la conception des équipements.

Une autre révolution concerne les vecteurs. Le développement rapide des drones et leur emploi sur le champ de bataille va bouleverser l'optronique. Ainsi on peut penser qu'une optronique spécifique va voir le jour. En effet, ces bases peuvent se déplacer en patrouilles, chaque vecteur pouvant assurer une fonction spécifique (imagerie UV, IR, détection NBC, télémétrie, désignation d'objectif ...). La bonne gouvernance de l'ensemble peut être assurée par des liaisons optiques dont la longueur d'onde et la portée assurent la discrétion. Par ailleurs, l'altitude, la vitesse de déplacement et la portée de cet ensemble ainsi que la durée d'autonomie d'une mission contribuent à modifier l'emploi de l'optronique dans les domaines de l'observation, de l'identification et de la désignation d'objectifs.

Limites du caractère dual civil/défense

Dans le domaine de la visualisation, les progrès observés au niveau des OLED en termes d'intégration, de définition, d'angle de vue, de rendement de conversion électro-optique (critère important pour assurer une autonomie) et de conformation (souplesse) bénéficieront au niveau des applications défense de l'immense marché civil. L'aspect ludique qui consiste à superposer à la vision directe, via un support de type lunette, une information recherchée (par couplage avec un téléphone portable : images, cartes topographiques, informations ...) sera certainement un autre exemple illustrant l'aspect dual (civil / défense) des technologies développées.

En revanche, les opérations de défense qui s'articulent autour :

- . de l'identification qui se doit d'être rapide et fiable,
- . d'une communication discrète, fiable et ergonomique,
- . d'une veille, d'une identification et d'une alerte pour un environnement potentiellement hostile et pouvant présenter un caractère agressif voire létal,
- . de la neutralisation à distance et précise avec une minimisation des effets collatéraux,

sont vraiment spécifiques au domaine couvert par l'optronique.

Ainsi, l'optronique répond à ces fonctions qui ne bénéficient pas forcément du caractère dual civil/défense. Il en va ainsi des sources accordables pour les CMO avec les composants non

linéaires associés, des systèmes d'imagerie hyperspectrale et d'imagerie active avec les plans focaux matriciels, de la furtivité optique ...

Imagerie et traitement des images

L'accroissement des performances (en terme de portée) de détection, de reconnaissance et d'identification passe par :

- . le développement de systèmes d'imagerie multi-spectraux (de l'UV à l'IR) déjà considérés pour des fonctions de détection de départ de missile, de veille IR et dans l'OSF,
- . une extension à l'hyperspectral,
- . l'intégration de l'analyse polarimétrique.

Ces concepts peuvent aboutir à l'établissement de fonctions de décamouflage (analyse du rendu de scène), de « déleurage » (exemple du blindé baudruche en caoutchouc), d'analyse de cibles furtives tout en surmontant les effets liés à la propagation dans une atmosphère perturbée (brouillard, fumées ...).

Cette démarche implique l'intégration d'opérations de fusion de capteurs (enregistrement en parallèle d'images sur différentes bandes spectrales ou superposition d'informations) qui existent déjà dans l'armement moderne.

Elle nécessite également de posséder et d'exploiter des banques de données associées à des critères de pertinence afin de discriminer les objets et de les identifier. Un tel domaine mérite à lui seul le développement d'actions qui s'apparentent à des études photométriques / radiométriques (colorimétrie multi / hyper spectrale et polarimétrique) et qui sont naturellement couvertes par le degré de confidentialité adapté.

La réalisation de systèmes dynamiques de mesure et de correction de front d'onde a largement contribué à l'amélioration de l'imagerie. Ces techniques d'optique adaptative initialement développées pour traiter les faisceaux laser de moyenne énergie afin de compenser les effets de turbulences (atmosphérique ou photo-induite) en propagation libre ont permis de donner un nouveau souffle à l'observation astronomique à partir de bases terrestres.

A ce stade, on doit mentionner le fait que l'observation satellitaire bénéficie et contribue au développement de certaines techniques mises en oeuvre dans l'observation aéroportée [1], notamment pour les aspects de classification de scènes.

Enfin, la surveillance et le renseignement tirent profit de ces nouvelles fonctions intégrées.

Comme on le voit, l'importance prise par les capteurs optroniques impose de pouvoir conserver leur fonctionnalité vis-à-vis d'une menace laser par exemple. Pour cela, une grande variété de mécanismes physiques peut être exploitée. Ils sont généralement adaptés à un type de menace bien identifiée (en longueur d'onde et selon le régime de fonctionnement). On retrouve là l'éternel dilemme représenté par la gestion évolutive du conflit entre le glaive et la cuirasse. Ainsi, à l'émergence du concept de contre-mesure optronique (CMO) a succédé celui de contre contre-mesure optronique (CCMO).

Sources et systèmes laser

Sous le terme d'optronique active, on sous-entend l'utilisation d'une source laser pour réaliser les fonctions :

- . de télémétrie ou/et de désignation d'objectifs,
- . de balayage pour imagerie 3D impulsionnelle,
- . de détection d'optique pointée,
- . de codage spatial pour guidage de missiles,
- . de flash quasi-cohérent pour imagerie,
- . de mesures des paramètres physiques d'environnement (LIDAR) et de détection à distance de composés chimiques ou biologiques dispersés dans l'atmosphère,
- . de contre-mesures optroniques (CMO).

Sous une forme plus sophistiquée, les fonctions de type LADAR exploitant le traitement de l'information cohérente couplées à un traitement du signal de type RADAR pour extraire des informations à caractère profilométrique et de vibrométrie peuvent trouver des applications industrielles pour le diagnostic de systèmes mécaniques.

La compacité, les niveaux de puissance émis, les cadences doivent être compatibles avec les possibilités d'emport du vecteur considéré et les portées désirées.

A priori, seules les sources état-solide peuvent répondre à ces critères à condition que la gestion des effets thermo-opto-mécaniques soit maîtrisée. Sont inclus ici les matériaux dédiés à l'optique non-linéaire qui permettent de réaliser des sources largement accordables spectralement ou à longueur d'onde d'émission spécifique.

Cependant, les avancées observées sur l'exploitation des propriétés des structures à puits quantiques réalisées dans les matériaux semiconducteurs III-V et la maîtrise d'hétérojonctions complexes ont permis le développement de nouvelles sources cohérentes (laser à cascade quantique QCL) ou de matrices bi-dimensionnelles de détecteurs IR à puits quantiques (QWIP).

Ces composants sont particulièrement adaptés pour réaliser des systèmes de détection de composés moléculaires par prélèvement in-situ ou pour concevoir des systèmes de transmission optique en propagation libre. Le caractère dual (civil/défense) peut être mis en avant au niveau des applications. En revanche, des opérations de leurrage exploitant les propriétés d'émission de sources ultra-compactes IR peuvent bénéficier de l'existence de telles sources semiconductrices.

Au niveau des matériaux massifs, on doit noter l'excellence de l'Ecole Française de Cristallogénèse et plus généralement de la science des matériaux solides. L'illustration de cette observation est représentée par les actions fédératrices couvertes par les anciens GdR Lasmat du CNRS/DGA et par le réseau CNRS « Cristaux Massifs et Dispositifs pour l'Optique (CMDO) ». Cependant, cet état des lieux présente un travers qui est que l'on assiste à l'émergence d'un grand nombre de nouveaux cristaux couvrant principalement l'émission laser ou/et l'optique nonlinéaire sans que ceux-ci puissent être vraiment utiles pour des applications en optronique (au sens large).

La formule exprimée par M. Hubert CURIEN [2] :

« Dans l'ordre ou le désordre, la matière condensée ne manque ni d'exemplarité ni de ruses. Les cristaux ont tout pour plaire aux esthètes et aux curieux »

reflète bien ce foisonnement.

Toujours est-il que plus de quarante années après l'avènement de l'électronique quantique (expression qui aujourd'hui aurait une toute autre signification), les matériaux de référence sont toujours les cristaux Nd :YAG (pour l'émission laser) et le niobate de lithium (LiNbO_3) pour ses propriétés non linéaires. On doit également mettre en avant l'application du concept de quasi-accord de phase sur ce matériau, obtenu par inversion périodique des domaines ferroélectriques (PPLN), qui lui a donné un nouvel attrait.

Une exception concerne le KTP bien que sa fenêtre de transparence dans le MIR contribue à réduire son emploi pour certaines applications.

Bien que la communauté scientifique soit dynamique, on doit observer que la composante industrielle liée à l'élaboration de matériaux est relativement absente, favorisant la production de produits à grande diffusion. Seules quelques PME fabriquent et commercialisent quelques cristaux (essentiellement non-linéaires) ou des équipements dédiés à la croissance et à la caractérisation. En revanche, une structure telle que celle mise en place au LETI à Grenoble [3], en interaction forte avec le milieu académique pourrait assurer cette fonction à la condition de centrer ses travaux sur les besoins réels des acteurs étatiques et industriels du domaine de la défense.

Des avancées remarquables ont été observées au niveau de la réalisation de matériaux laser à base de céramiques. En particulier, il a été montré que les propriétés optiques et en émission laser d'une céramique Nd :YAG sont identiques à celles obtenues sur un monocristal. Cette démonstration peut contribuer à modifier considérablement les architectures de laser solides pompés par diodes selon :

- . les dimensions et formes pouvant être réalisées (1m x 1m x 2cm est envisageable),
- . l'intégration de parties non dopées (gestion des effets thermiques),
- . le dopage à gradient ou à forte concentration (quelques % atomiques).

Si l'on compare les propriétés mécaniques, thermiques et les sections efficaces d'absorption et d'émission à celles des verres, on ne peut que se réjouir d'une telle avancée qui pourrait bouleverser les architectures autour du LMJ par exemple (au spectre près) ou du laser de moyenne énergie pour des applications qui relèvent de l'arme laser tactique.

Les travaux menés au CEA/CESTA en collaboration avec l'ICMCB [4] sur cette thématique sont à prendre en considération. En effet :

- . cette technique peut être mise en œuvre à partir d'oxydes réfractaires et de bonne qualité optique (Y_2O_3) sans avoir à synthétiser de tels mono-cristaux qui nécessitent une croissance à très haute température. Les matériaux pour l'optique peuvent voir étendre leurs domaines d'applications,

- . le dopage Er ou le co-dopage Yb :Er de matrices appropriées mériterait d'être analysé afin de pouvoir se substituer aux verres dopés dits athermiques pour des applications laser qui puissent satisfaire au critère de sécurité oculaire.

On doit également noter l'émergence de sources à très haute luminance exploitant le caractère uni-modale du mode de propagation dans les fibres laser. Cette configuration présente un indéniable intérêt pour son efficacité, sa compacité et sa flexibilité. Il en va de même pour les configurations MOPA à fibres optiques amplificatrices.

Enfin, le domaine des armes à faisceau dirigé intègre l'arme laser tactique (THEL) qui, avec sa composante mobile (programme MTHEL Américano-Israélien), peut modifier le concept et l'architecture de la Bulle Opérationnelle Aéroterrestre en l'enrichissant. Dans ce domaine on doit noter les efforts menés aux Etats-Unis sur l'emploi de milieux solides pompés par flash ou par diodes laser de puissance (SSHCL) [5].

Les avantages potentiels liés à l'emploi de lasers en qualité d'arme reposent sur :

- . la vitesse de propagation du faisceau entrant en interaction avec la cible,
- . la haute précision à distance,
- . faible coût par tir et logistique réduite (absence de stock de munitions ou de têtes militarisées).

Ces propriétés expliquent à elles seules l'intérêt d'un tel système tout en mesurant les défis technologiques qu'il présente.

Le concept d'arme laser peut être décliné selon plusieurs fonctions avec des objectifs particuliers :

- . l'arme laser stratégique,
- . l'arme laser tactique.

Le premier concept est représenté par les programmes SBL et ABL développés aux Etats-Unis. Il consiste à embarquer un laser de destruction ou plus exactement de déstabilisation de missiles balistiques intercontinentaux. Il convient de différencier l'aspect temps d'accès à la cible de celui caractérisant les effets induits.

Ces sources sont généralement représentées par des lasers chimiques (HF pour le programme SBL ou COIL dans le système ABL) embarqués sur des plate-formes telles que des satellites ou sur des avions gros porteurs. Le second concept a pour objet de protéger une zone d'une menace de type missiles ou roquettes en employant un laser DF (programme THEL) ou à état-solide pompé optiquement par flashes ou par diodes de puissance.

Il est évident que de tels programmes ou projets voient leurs finalités atteintes si l'on maîtrise toute la chaîne de conception et de fabrication des composants optiques (à haute tenue au flux laser) devant être mis en œuvre.

On doit noter que les problèmes d'acquisition, d'identification et de suivi de cibles sont de loin les points essentiels à traiter au niveau du système d'arme, le laser étant un équipement spécifique caractérisé par son mode de fonctionnement et la longueur d'onde à laquelle il opère.

Spécificité des systèmes optroniques

Les systèmes optroniques sont fondamentalement tributaires des propriétés optiques des matériaux, de leurs disponibilités et des technologies mises en oeuvre.

Contrairement à l'opinion forgée justifiant une politique de désengagement vis-à-vis des développements technologiques ou de soutien à une recherche physique de base, les systèmes optroniques présentent des spécificités qui ne se nourrissent pas forcément des composants et fonctions développés pour le marché ouvert et à grande diffusion.

A titre d'exemple, l'obligation de concevoir des systèmes d'imagerie active opérant en régime de sécurité oculaire impose de pouvoir disposer de composants détecteurs à plan focaux matriciels dédiés. Bien que les matériaux envisagés soient initialement développés pour satisfaire le marché des télécommunications optiques, la configuration des détecteurs disponibles sur étagère (monopuce) ne répond pas au problème posé (matrice 2D, voire 3D avec réponse temporelle, de type CCD).

Généralement, les quantités de systèmes optroniques sont faibles (unité à quelques milliers) avec des contraintes d'emploi et de conditionnement sévères, une fiabilité éprouvée et une durée de vie élevée.

De ce point de vue, l'expérience américaine est un bon exemple de ce qu'il faut éviter. En effet, à la fin du dernier millénaire, la bulle des télécommunications optiques et les investisseurs financiers ont contribué à orienter ou à modifier les choix stratégiques des industriels de l'optoélectronique (exemple SDL) pour adresser le « vrai marché ». Le développement industriel de composants spécifiques pour la défense a subi le contre-coup de ce changement de cap. Seuls les grands organismes publics ou les industriels de la défense avec leurs propres outils technologiques ont pu satisfaire leurs besoins pour réaliser des démonstrateurs. En revanche, un organisme comme la NASA s'est trouvé aculé à revoir le mode de fonctionnement des approvisionnements en diodes laser tout en restructurant ses activités LIDAR.

L'autre écueil est représenté par un embargo temporaire ou restrictif qui peut être appliqué sur certains composants clés à un moment lié à l'actualité ou pour des motifs stratégiques (contrainte politique, concurrence commerciale ...).

L'optronique couvre une grande diversité de composants, d'équipements et de systèmes qui dépendent des conditions d'emploi technico-opérationnel. Développer un système opérant à partir d'un bâtiment de surface dans le domaine naval n'aura pas les mêmes caractéristiques que celui embarqué sur un aéronef. Un équipement devant être déployé dans l'hémisphère nord ne présentera pas forcément les meilleures caractéristiques s'il doit être exploité dans une zone tropicale ou semi-désertique.

Un exemple qui rend compte des spécificités des équipements ou des systèmes peut être illustré par les sources de haute ou moyenne énergie. Développer un outil de la classe MJ pour réaliser des opérations de fusion nucléaire par confinement inertiel sur un intervalle de temps de quelques nanosecondes n'adresse pas les problèmes liés à la conception d'un système d'arme laser de la classe MW quasi-continu qui sur une seconde délivre une énergie de 1MJ.

Par ailleurs, la conception de sources laser avec une émission de forte puissance moyenne passe par une maîtrise et par une connaissance de plus en plus affinée des mécanismes d'endommagement optique des matériaux et des couches optiques de revêtement. Encore une fois, selon le type de matériau et les domaines spectraux et temporels considérés, les mécanismes mis en jeu sont particuliers.

Sur le plan national, la Base Industrielle et Technologique de Défense (BITD) est structurée en couches industrielles, dans un contexte fortement concurrentiel, qui présentent globalement un caractère hétérogène. En effet, on observe :

- . des « systémiers » et des « équipementiers » en bonne position au niveau européen ou bien implantés sur le plan international en cultivant le caractère multi-domestique,
- . des « composants » plus fragiles sur le plan industriel,
- . une recherche institutionnelle de base et pour certains acteurs une recherche industrielle, de bonne tenue.

La fragilité de la couche « composants » provient :

- . de la haute technicité du domaine qui nécessite souvent des investissements importants et lourds en coût de fonctionnement,
- . de l'absence d'effets de séries,
- . du fait que l'aspect critique des composants présente un caractère peu dual.

C'est donc dans cet environnement et avec ces contraintes que le monde de l'optronique développe produits et systèmes [6].

Conclusion et recommandations

Bien qu'il existe une interdépendance avec le domaine civil, en particulier avec celui couvert par l'aspect sécuritaire, le monde de l'optronique a des spécificités que l'on trouve au niveau des composants et des systèmes. Une erreur serait de croire que la base technologique civile puisse totalement répondre aux besoins militaires.

Ainsi, le développement de l'optronique passe par une maîtrise des composants de base que sont :

- . les matériaux pour l'optique (linéaire et non linéaire) en incluant le développement de la filière des verres et cristaux céramiques,
- . les composants optoélectroniques pour assurer :
 - le pompage de matrices solides dopées par des terres rares ou par des ions métalliques de transition. C'est ce mode de pompage qui autorise la conception de sources laser à haut rendement électro-optique tout en assurant l'obtention de faisceaux laser à forte luminance énergétique,
 - la détection (QWIP et MCT) PIR, MIR et LIR,
 - l'émission directe MIR et LIR (QCL).
- . les composants et systèmes d'imagerie PIR et plus généralement IR en incluant les concepts de rétine intelligente,

et qui présentent un caractère stratégique.

Bien que les compétences scientifiques nationales de la recherche académique et industrielle soient de haute qualité au niveau des matériaux et des composants, le relais purement industriel achoppe par le manque de marché de volume, ce qui explique que ce type de technologie ne puisse être supportée que par de grands groupes industriels tout en devant s'assurer de l'existence d'une pérennité sur la disponibilité des composants primaires.

De ce point de vue, une réflexion devrait être menée sur la mise en place d'une structure dédiée aux matériaux pour l'optique pouvant alimenter en qualité et en volume aussi bien les domaines de la défense que ceux de la recherche de base.

Il serait donc souhaitable de coordonner une action spécifique pouvant répondre aux besoins réels de l'optronique et en se focalisant sur les points suivants :

- . matériaux pour les sources sub-ps pompées par diodes,*
- . matériaux laser pour l'UV accordable,*
- . matériaux laser à émission dans le PIR (sécurité oculaire) / le MIR et pompés par diodes, ...*

en intégrant le fait que l'on recherche de fortes puissances crêtes (TW voire PW) ou de l'énergie (Joule à quelques kJ selon la durée d'impulsion) tout en privilégiant les filières technologiques existantes au niveau des diodes laser de puissance (GaAs/GaAlAs, GaInAs/GaAs ...).

Ceci nécessite que ces matériaux puissent satisfaire aux critères suivants :

- . compatibilité avec la fabrication de volumes importants de matériaux,*
- . coût d'accessibilité réduit,*
- . reproductibilité assurée et façonnage aisé,*
- . bonnes propriétés thermo-mécaniques,*
- . seuil de dommage optique élevé.*

A ce stade, il convient de rappeler qu'il existe un grand « gap » entre fabriquer un échantillon de laboratoire et le fabriquer sous un fort volume. En effet, des considérations liées à l'hydrodynamique, à la thermodynamique locale peuvent affecter l'obtention de matériaux massifs de grandes dimensions et de bonnes qualités optiques.

En ce qui concerne les matériaux, il convient également de soutenir des actions qui exploitent les propriétés photochromiques ou électro-chromiques de matériaux pour modifier les propriétés de transmission ou de réflectivité de composants optiques. Le couplage entre les nanotechnologies (au sens large allant de la structuration artificielle de la matière à une échelle submicronique à l'inclusion de nano-objets) et la physique des matériaux (incluant la matière molle) doit contribuer à étendre l'emploi de tels concepts en optronique (réduction de signature optique / hyperfréquence, effet caméléon) et sur des bandes spectrales étendues.

La réalisation de fonctions sécuritaires est également tributaire des propriétés des matériaux pour l'optique et plus particulièrement de leur mise en forme. A priori, les polymères et les photopolymères sont les matériaux de choix et l'activation électrique ou hyperfréquence des propriétés optiques ou émissives peuvent présenter un intérêt pour l'identification.

Le domaine de la protection de capteurs, incluant la vision humaine, est toujours un sujet d'actualité, car aucun système n'est vraiment satisfaisant. Les systèmes d'armes dans le futur seront pour l'essentiel commandés à distance à partir de données issues de capteurs et en conséquence verront leur efficacité tributaire d'un durcissement vis-à-vis d'une neutralisation. En effet, la menace laser est aujourd'hui de plus en plus étendue et diversifiée en termes :

- . de domaine spectral (UV à LIR avec accordabilité)*
- . de mode de fonctionnement (continu, impulsionnel dont les sources fs),*
- . d'énergie ou de puissance crête.*

Si l'on sait se prémunir contre cette menace sur un domaine spectral défini et pour un mode de fonctionnement conventionnel, en revanche la diversité spectrale à l'émission des sources laser et l'émergence de systèmes fonctionnant en régime picoseconde ou sub-picoseconde de forte puissance crête peuvent représenter à moyen terme une arme d'aveuglement de senseurs optroniques ou de perturbation des propriétés de transmission d'une chaîne optronique (voire hyperfréquence).

Le domaine de l'imagerie s'oriente vers la très haute résolution à partir de deux concepts qui sont représentés par l'utilisation de grandes matrices de détecteurs IR et par la synthèse d'ouverture optique multi-pupillaire / lacunaire, passive ou active. Ce thème est enrichi par l'excellente compétence nationale démontrée dans le domaine de la correction en temps réel des turbulences atmosphériques sur site [7]. En revanche, l'intégration à un porteur mobile implique de nouvelles contraintes d'emploi qui méritent un ré-examen de cette technique aujourd'hui incontournable.

Dans ce cadre général de l'imagerie, un vaste champ d'investigation s'offre à la communauté scientifique en associant celle de l'optique aux spécialistes du traitement du signal numérique. Ainsi, le concept d'holographie électronique prend tout son sens en mariant les techniques de l'optique de Fourier (cohérente ou incohérente) avec celles de l'électronique et de l'informatique. Un autre aspect est représenté par le traitement en temps réel de l'image en intégrant un pré-traitement au niveau des convertisseurs optique/électrique.

Au niveau des composants, outre les plan focaux pour l'imagerie, les concepts de filtres accordables robustes à agilité spectrale grand et petit champ sous commande électrique sont, parmi bien d'autres, des concepts à revisiter.

L'aspect plus futuriste et mobilisateur en terme de défis est représenté par le déploiement du concept d'arme laser. Comme nous l'avons mentionné, des expérimentations ont validé l'emploi d'un tel système d'arme de protection de zone selon un scénario coopératif. La maturité d'un tel système passe par la résolution d'une multitude de problèmes et par le choix de filières technologiques et d'une architecture qui autoriseraient la mobilité sur un théâtre opérationnel.

Ces remarques ne font que conforter les observations présentées par M. P. Schanne [8] :

« On constate que la majorité des ruptures et innovations technologiques se révèlent au niveau des technologies de base (composants, matériaux ...) et que la naissance de concepts d'équipements optroniques ou de nouvelles applications utilisant uniquement des technologies existantes est rare »

Plus généralement, certaines actions proposées peuvent mériter un soutien à l'innovation avec la mise en œuvre d'un partenariat entre des laboratoires et des industriels pouvant s'étendre au niveau européen tout en assurant un accès pérenne au niveau des composants.

En conclusion, les progrès spectaculaires de l'optronique et son caractère fédérateur méritent des actions volontaristes associant les acteurs de la recherche publique et les industriels concernés afin de répondre aux défis de ce nouveau millénaire en assurant la protection et la sécurité de nos concitoyens civils et militaires. Le développement de cette discipline doit contribuer à maintenir un caractère dissuasif ou pacificateur à nos armées tout en préservant un maintien des capacités technologiques nationale et par voie de conséquence européenne.

Lexique

ABL : Air Borne Laser

BITD : Base Industrielle et Technologique de Défense

CMO : Contre-Mesure Optronique

CCMO : Contre-Contre Mesure Optronique

COIL : Chemical Oxygen Iodine Laser

FLIR : Forward Looking IR

fs : femtoseconde (10^{-15} seconde)

HF : Fluorure d'hydrogène

IR : Infra-Rouge

KTP : potassium titanyl phosphate

LIDAR : LIght Detection and Ranging

LIR : Lointain Infra-Rouge

LMJ : Laser Méga-Joule

MCT : Mercury-Cadmium-Telluride (HgCdTe)

MIR : Moyen Infra-Rouge

MJ : Méga-Joule (10^6 Joules)

MOPA : Master-Oscillator Power Amplifier

MTHL : Mobile Tactical High Energy Laser

OEM : Original Equipment Manufacturers

OLED : Organic Light Emitting Diode

OSF : Optronique Secteur Frontal (sur Rafale)

PIR : Proche Infra-Rouge

POD : Nacelle

PPLN : Periodically Polled Lithium Niobate

QCL : Quantum Cascade Laser

QWIP : Quantum Wells Infrared Photodiode

SBL : Space Based Laser

SSHCL : Solid State Heat Capacity Laser
THEL : Tactical High Energy Laser
UV : Ultra-Violet

Références

- [1] “ Rapport d’information n° 3219 sur le renseignement par l’image ”
Déposé par la commission des finances, de l’économie générale du plan
Présenté par Jean-Michel BOUCHERON
Assemblée Nationale, 4 juillet 2001
- [2] “ La science des cristaux : de l’ordre au désordre ”
H. Curien
in les Cristaux
La lettre de l’Académie des Sciences n°5 automne 2000
- [3] “ La Plate-forme Cristallogenèse du LETI au CEA-Grenoble et les Cristaux pour l’Optique ”
B. Ferrand, D. Pelenc, L. Fulbert
Alpes Optique 1 juillet 2003
- [4] “ Nouvelles sources solides pour laser : les céramiques transparentes ”
B. Le Garrec, A. Dupont, C. Parent, J.M. Heintz
Journées Nationales des Cristaux pour l’Optique JNCO 2003,
Centre d’Accueil de Valpré, Ecully, 5-7 Novembre 2003
- [5] “ Solid-State High-Energy Laser Weapons ”
J. Hecht
Optics & Photonics News, Jan. 2003 p. 42
- [6] “ Les marchés de l’Optique-Photonique : Spatial – Défense ”
Optics Valley 2003
- [7] “ L’imagerie optique à haute résolution : une révolution dans la conception des instruments optiques ”
M. Séchaud
Revue Scientifique & Technique de la Défense n°50 Décembre 2000 p. 13
- [8] “ Les défis de l’optronique à l’aube du XXI^e siècle ”
P. Schanne
Revue Scientifique & Technique de la Défense n°50 Décembre 2000 p. 5

Annexe 1 : Fusion inertielle par voie laser

Le projet LMJ a pour objectif de disposer d'un outil expérimental permettant de conforter et de confronter les simulations sur l'initiation d'une fusion thermonucléaire.

Là encore les défis sont multiples et les technologies mises en œuvre, bien qu'éprouvées à petite échelle, ont nécessité le lancement d'études spécifiques et l'intégration de nouvelles techniques (traitements sol-gel, croissance rapide de monocristaux de volumes importants, métrologie de grande optique, correction de surface d'onde dans les lasers de puissance [A1.1], synchronisation, alignement et pointage ...) [A1.2].

Les études préliminaires se sont concrétisées par la réalisation de la LIL (Ligne d'Intégration Laser) dont l'objectif est d'obtenir 60kJ à partir de 8 faisceaux.

En complément, des actions sur la fusion par allumage rapide sont représentées par la réalisation de sources PetaWatts dédiées. Les programmes LULI 2000 et LUCIA (Lasers Ultra-Courts Intenses et Applications) couvrent cette thématique et plus généralement la physique des plasmas ultra-chauds et l'émission de rayonnements X et gamma [A1.3].

Références

[A1.1] “ Optique ”

Chocs, Revue Scientifique et Technique de la DAM
n°27 Juin 2003

[A1.2] “ Technologie pour un laser MégaJoule ”

M. André, M. Novaro, D. Scirmann
Chocs, Revue Scientifique et Technique de la DAM
N°13 Avril 1995

[A1.3] “ Quand la lumière recrée le soleil ”

A.Migus
CNRS THEMA n°1, 2^{ème} trimestre 2003 p. 29

Chapitre 7

PROCEDES DE FABRICATION

Nous souhaitons dans ce chapitre aborder les procédés de fabrication liés à l'optique sous deux aspects très différents l'un de l'autre, mais tout aussi importants dans l'ensemble de la filière optique.

Le premier aspect concerne les procédés de production (usinage et traitements) des composants optiques passifs nécessaires à l'industrie de l'optique et de l'instrumentation,. Les aspects matériaux associés seront également abordés.

Nous y aborderons également les évolutions récentes des besoins en pièces optiques et en traitements pour des applications non instrumentales de l'optique telles que l'automobile, le bâtiment et l'industrie du flaconnage de luxe.

Le deuxième aspect concerne l'utilisation de la lumière comme outil de fabrication, aussi bien dans la filière optique que pour toute autre filière (mécanique en particulier). Nous y aborderons plus particulièrement les applications des lasers comme outil de production ainsi que les apports de l'optique dans les procédés de stéréo lithographie et de prototypage rapide.

7.1 Première partie - Les procédés liés à la production de pièces optiques passives

7.1.1 Les Composants optiques sur substrats verres, métaux cristaux et céramiques pour applications instrumentales

7.1.1.1 Evolutions des techniques d'usinage et de polissage des composants optiques polissage (substrats verres, métaux, cristaux, céramiques)

Le polissage des composants optiques, quel que soit le domaine spectral, demeure une technologie indispensable à la réalisation des instruments optiques. Les précisions demandées, la nature des substrats utilisés, évoluent rapidement depuis quelques années, ce qui entraîne des évolutions importantes dans les procédés de production associés.

Ces évolutions concernent aussi bien les profils des composants (surfaces asphériques, diffractives,...) que les précisions recherchées et la qualité des états de surface (principalement en terme de rugosité)

Pour le polissage des surfaces planes et sphériques, les technologies classiques restent largement utilisées et les travaux de R&D, menés aussi bien par les industriels que par les

laboratoires de l'Institut d'Optique, sont orientés sur l'amélioration de la qualité des états de surface

Les moyens de production conventionnels restent encore les plus utilisés dans les ateliers de production et ceci malgré la part importante de main d'œuvre spécialisée qu'ils nécessitent. Ceci peut être lié à des problèmes d'investissement, à ce que les séries à réaliser sont trop faibles pour être automatisées, ou parce que ces moyens restent encore les seuls capables de réaliser un haut niveau de qualité (en précision et en état de surface). Cependant il est apparu sur le marché toute une gamme de machines à commandes numériques permettant de réaliser la totalité des opérations d'ébauchage, doucissage, polissage, débordage et chanfreinage. Les dimensions des pièces réalisables et les précisions obtenues avec ces machines répondent à une part importante des applications du secteur de l'optique instrumentale

Le taux d'équipement des industriels français en centres d'usinage optiques est encore faible et est en retard par rapport à des pays traditionnellement concurrents, ou même par rapport à certains pays émergents. Ceci est vraisemblablement dû à des niveaux d'investissements élevés par rapport aux moyens conventionnels, et à la nécessité de personnel compétent en conduite de centres d'usinage à commande numérique et en travail du verre (or il n'existe pas de formation initiale correspondante en France). De plus ces centres d'usinage automatisés, ainsi que les nouvelles technologies de polissage utilisées pour l'asphérique, ne peuvent encore satisfaire à l'ensemble des besoins en polissage exprimés par les industriels français de l'instrumentation.

Ceci implique donc le maintien de capacités de production en polissage conventionnel qui seul permet, actuellement, la réalisation des pièces optiques de très haute précision, ainsi que le polissage de certains verres, cristaux ou céramiques, et qui reste plus économique pour la réalisation de prototypes ou de séries limitées.

Le polissage de surfaces asphériques de précision n'a démarré de façon réellement industrielle, il y a environ 30 ans, que dans le seul domaine de l'infra rouge, grâce à l'apparition de centres d'usinage mécaniques multi axes suffisamment précis et équipés d'outils à pointe diamant. Toutefois seuls certains métaux et certains cristaux I.R. étaient usinables, mais pas les verres.

Les progrès dans les meules de micro rectification utilisables avec les verres et les développements des techniques de polissage souple associées à des robots multi axes, ont permis à certains ateliers industriels de développer plus récemment des procédés d'usinage de composants asphériques en verres et même en céramiques. Mais ces procédés se sont révélés peu déterministes en terme de durée d'usinage et aléatoires en ce qui concerne le profil final. Ils avaient cependant l'avantage d'exister et d'avoir permis la réalisation d'équipements qui autrement n'auraient jamais vu le jour.

Ce n'est que dans la dernière décennie qu'ont été développées, dans les laboratoires de l'Institut d'optique (seul laboratoire public travaillant sur les procédés d'usinage optique) et dans ceux de REOSC (maintenant SAGEM), différents procédés d'usinage ionique, qui ont réellement permis de résoudre ces problèmes d'usinage asphérique de grande précision, sur verres ou céramiques utilisables dans le spectre visible ou dans l'U.V., et ceci avec des temps d'usinage prédictibles et compatibles d'applications comme le spatial, l'astronomie et les grands programmes scientifiques, mais ceci au prix d'installations sous vide complexes et coûteuses.

Pendant la même période, un nouveau procédé de polissage localisé, basé sur le principe dit de "polissage magnéto rhéologique" était développé aux USA. Ces travaux ont débouché sur la production de machines de polissage industrielles qui associées à des process

de micro rectification et de polissage souple déjà développés, forment un process global, industrialisé, de production de composants asphériques de grande précision, sur verres, céramiques ou métaux, utilisables dans le spectre visible et avec des temps d'usinage courts (quelques dizaines de minutes) permettant l'ouverture à des marchés de plus grandes séries. Au moins deux industriels français (Thalès Angénieux et SESO) se sont aujourd'hui dotés de cette technologie (produite aux USA et en RFA) et l'utilisent de façon courante en production de série.

Le pôle optique et vision de Saint Etienne a été le premier en France à installer une plate forme de transfert technologique, accessible aux industriels, comprenant un ensemble de machines pour l'usinage à la pointe diamant, la micro rectification (de 600 mm de diamètre) et le polissage magnéto rhéologique, ainsi que les moyens de contrôle associés.

7.1.1.2 La position et la problématique de la production des composants optiques pour l'instrumentation en France

La France a toujours essayé de conserver une indépendance dans le domaine de la production des composants optiques de précision tout en s'associant avec ses partenaires Européens ou mondiaux, ce qui lui a permis de développer de solides positions dans des secteurs tels que le spatial, l'aéronautique, l'armement, la recherche, les télécommunications, les optiques professionnelles de prise de vue (zooms), l'instrumentation, etc...., secteurs qui font appel à l'optique et qui nécessitent des capacités industrielles de production.

Pourtant ce domaine de la production des composants optiques est actuellement en danger en France. Il ne reste aujourd'hui que très peu d'entreprises réalisant du polissage et un seul laboratoire public à Orsay.

Cinq entreprises, spécialistes de systèmes ou d'équipement optiques complexes, disposent d'ateliers de production de composants. Quatre, dont les 2 plus importantes, font partie de grands groupes industriels et n'ont pas fondamentalement vocation à travailler en sous-traitance. Seule la société SESO n'est liée à aucun groupe industriel. Elles sont toutes impliquées dans les grands programmes nationaux et européens, ainsi qu'à l'exportation et toutes ont une réputation débordant largement le territoire national. Maintenir leur haut niveau technologique, gage d'un avantage concurrentiel, les contraint à développer, seuls ou avec des laboratoires publics, des programmes d'amélioration permanente ou d'innovations de leurs processus d'usinage et à financer des investissements importants (en moyens et en personnel). La taille, malgré tout limitée, de ces entités spécialisées, limite leurs ressources en R&D face à certains concurrents étrangers beaucoup plus importants.

Les autres entreprises de production de composants optiques pour l'instrumentation sont des TPE (dont la plus importante est la société OPTIQUE FICHOU), voir même des TTPE, qui font toutes appel à des processus de polissage conventionnels. Leur coût de main d'œuvre font qu'elles ont de plus en plus de mal à faire face à la concurrence étrangère. Leur taille et un marché très concurrentiel, ne leur permettent que difficilement de financer et conduire des programmes de développement, ou même simplement d'implantation de nouveaux processus technologiques. Elles n'ont pas la capacité à s'intégrer dans des programmes aidés et la politique française méconnaît les TPE, par exemple elles ne sont plus retenues dans les marchés tri-annuels de fourniture de composants optiques du CNRS, et il leur est très difficile de se faire reconnaître par les services achats des grands groupes industriels français comme sources d'approvisionnement pour les programmes de série. Ceci représente autant de freins à leur développement.

Le secteur d'activité de l'instrumentation optique de précision pourrait donc, dans les prochaines années, dépendre de plus en plus de l'étranger, les capacités de production des composants risquant de disparaître à court terme, hormis quelques niches très techniques, plutôt maîtrisées par les entreprises les plus importantes qui, si elles savent rester compétitives, peuvent adosser une partie de leur activité à un marché captif.

7.1.1.3 Les aspects de la formation associées aux processus de polissage

L'enquête menée par l'AFPA sur l'adéquation emploi/formation fait apparaître un réel problème au niveau du recrutement des opérateurs en ce qui concerne les activités de polissage des composants optiques, en particulier, ainsi qu'en montage optique. Les entreprises ont besoin d'une formation initiale spécialisée en optique (niveau V et/ou IV) (elles plébiscitent l'ancien BEP du lycée Fresnel), et elles souhaitent un niveau bac professionnel adapté. Or le problème est devenu critique à la suite de l'interruption de dispense du BEP en optique par le Ministère de l'Education nationale, et la méconnaissance de formations annexes comme le CQP développé à l'initiative de l'AFOP.

La réponse actuelle, bien que jugée insuffisante, consiste à recruter des opérateurs de fabrication avec des formations initiales en mécanique ou micromécanique et à les former en interne aux métiers de l'optique.

La Commission Nationale pour la formation aux métiers de l'Optique et de la Photonique a fait de ce problème, dès sa création, un de ses axes prioritaire de travail. Des enquêtes approfondies sur les besoins et les compétences demandées ont été menées. Ceci a permis à la rentrée 2003-2004 l'ouverture d'un CQP de polisseur (niveau V) en Ile de France et d'une formation en alternance d'assembleurs (niveau bac pro productique +1 an) à Saint Etienne dans le cadre d'une FCIL "usineur-assembleur" dans les secteurs de l'optique. De plus, le travail mené au sein de la Commission Paritaire Consultative concernant la part de l'optique dans le nouveau bac pro micro technologies a été poursuivi.

Ces différentes enquêtes montrent que le besoin en nombre de nouveaux opérateurs de polissage n'est pas très élevé, mais pérenne. Elles montrent également que les compétences demandées pour les futurs opérateurs de polissage intègrent les évolutions des technologies industrielles de polissage, ce qui pourrait conduire à envisager deux niveaux de formations différents (niveau BEP et niveau Bac ou option complémentaire à un Bac Pro).

Le nombre de personnes à former, les moyens à mettre en place, le nombre limité d'enseignants ou d'intervenants professionnels formés à ces techniques particulières, conduira sûrement à envisager de concentrer ces formations en un nombre de sites très limités, disposant de préférence dès maintenant d'une partie des ressources.

Le problème de la formation des opérateurs de montage est différent, car il concerne un nombre de personnes à former plus importants et une grande diversité d'entreprises concernées. Le niveau recherché serait plutôt un niveau IV, et les entreprises souhaitent de plus en plus, non seulement des connaissances en optique, mais également en mécanique de précision, en intégration de composants optoélectroniques et en câblage.

7.1.1.4 Les techniques de métrologie associées à la production des composants optiques de précision

Le contrôle métrologique des composants en cours et en fin de production font appel à des techniques de plus en plus performantes compte tenu des performances demandées. Peu de laboratoires publics travaillent sur ce point (IOTA à Orsay, ESPCI à Paris, LAM à Marseille, Ecole des mines de Saint Etienne). Ce domaine de recherche est toujours le parent pauvre et trouve difficilement des financements, tant pour la recherche (peu glorieux et peu

sujet à publications) que pour la "routine" (les industriels n'étant pas prêts à payer le coût réel de la métrologie de pointe), et les laboratoires font de la métrologie car ils en ont besoin comme support à d'autres travaux de recherche. Il semble qu'il en soit de même dans les autres pays. Tous les équipements automatiques de contrôle en production sont importés, surtout des USA.

Ceci pose toutefois le problème de la formation associée des opérateurs dont il faut tenir compte, surtout si l'industrie est conduite à faire appel à des formations initiales en mécanique. On notera également que ce sujet ne passionne pas les étudiants, et qu'il n'est pas forcément intégré dans les programmes des écoles d'ingénieurs (par exemple à l'ESO les élèves reçoivent une solide formation de base afin de pouvoir maîtriser les aspects métrologiques associés aux travaux pratiques, mais l'enseignement théorique approfondi de la métrologie ne fait plus partie du tronc commun et n'est plus qu'une option).

7.1.2 Les matériaux (hors polymères) pour l'instrumentation optique

7.1.2.1 les verres optiques

La France, jusqu'à ces dernières années, produisait une gamme complète des verres optiques dans les usines françaises de CORNING. Les industriels français pouvaient également avoir accès au catalogue très complet du verrier allemand SCHOTT et depuis une dizaine d'années au verrier japonais OHARA. Tous ces industriels disposaient de puissants laboratoires de recherche.

Ce tableau a beaucoup évolué, ces dernières années, avec l'arrêt par Corning des activités de production des verres spéciaux pour l'optique. Il n'existe plus de R&D en France dans ce domaine. De plus le problème de l'approvisionnement des verres optiques devient de plus en plus critique (et en particulier pour le TPE françaises) et ceci pour deux raisons:

- Diminution du nombre de fournisseurs disposant d'un catalogue complet de verres. La société Schott dispose de plus en plus d'un monopole en Europe et impose des conditions d'approvisionnement (en terme de volumes minimum et de délais) difficilement accessibles aux TPE. Ceci a conduit les entreprises à s'approvisionner de plus en plus au Japon.

- Arrêt de production de certains types de verres. En effet les producteurs ont programmé l'arrêt de la production des verres faisant appel à des métaux lourds. Certes, leurs laboratoires ont cherché à développer des verres de remplacement, sans qu'il y ait toujours une exacte correspondance en particulier au niveau de la dispersion spectrale. Ceci aura aussi, dans les années à venir, des répercussions économiques sur les équipements car il faudra reprendre les dossiers de définition optique.

7.1.2.2 les verres non conventionnels, les cristaux et céramiques

Les travaux de l'Université de Rennes sur les verres non conventionnels pour l'infrarouge à base de verres chalcogénures, ont abouti à la mise au point d'un nouveau matériau, le GASIR. L'industrialisation d'une technique de moulage de ce matériau a été menée par la société française VERTEX S.A (devenue filiale du groupe belge UMICORE-IR-Glass, producteur entre autre de germanium optique et de ZnSe).

Les travaux sur les verres chalcogénures ont aussi débouché sur des fibres pour guidage de lumière I.R.

Dans le domaine des céramiques, le Carbure de Silicium est de plus en plus couramment utilisé comme substrat de miroirs, en particulier pour l'aéronautique et le spatial.

Plusieurs industriels en maîtrisent bien les process de mise en forme, de polissage et de traitement.

Dans le domaine des cristaux optiques, deux entreprises françaises occupent des positions fortes dans leurs secteurs. La société RSA LE RUBIS est l'un des leaders mondiaux pour la fabrication de monocristaux de saphir pour l'optique dans l'I.R, le visible et l'U.V. De son côté le groupe SAINT GOBAIN est un producteur important d'une large gamme de cristaux pour l'optique et en particulier de cristaux de saphir et des fluorures (CaF_2 , BaF_2 , LiF ,...) pour l'optique par transmission. Dans son organisation, ce groupe a réparti ses activités de production entre la France (25% en moyenne) et les USA (75%). En particulier la totalité de la production des cristaux pour l'optique de transmission (dont le CaF_2 qui présente un intérêt particulier pour l'U.V et l'U.V lointain) est faite aux USA. Par contre les cristaux pour l'optique X sont produits uniquement en France.

7.1.2.3 les matériaux à gradients d'indice (GRIN)

Les concepteurs de systèmes optiques recherchent des matériaux qui leur permettraient de réduire encore le nombre de composants, au delà de l'apport de l'asphérisation. Ces recherches montrent l'intérêt qu'il y aurait à pouvoir disposer de matériaux à gradients d'indices et surtout à gradients d'indices axiaux.

Seule une entreprise américaine propose quelques produits, mais leur qualité et les faibles dimensions accessibles ne permettent pas d'envisager leur utilisation pour la plupart des applications dans le secteur de l'instrumentation optique de précision.

Il semble qu'aucun laboratoire de recherche français (public ou privé) ne mène des travaux de R&D sur de tels matériaux, qui correspondent pourtant à un réel besoin industriel. Seul le laboratoire TSI de Saint Etienne conduit quelques investigations dans cet axe qu'il serait intéressant de soutenir

7.1.2.4 Conclusions

Il semble que, de façon générale, l'approvisionnement concernant les cristaux optiques, les matériaux infra rouges et les céramiques, ne pose pas de problèmes particuliers, aujourd'hui aux industriels. On peut toutefois noter une dépendance très forte de l'industrie française vis-à-vis de l'étranger et plus particulièrement des USA et du Japon avec localement quelques difficultés d'accès à certains matériaux. On remarquera que dans ces différents domaines, et malgré une recherche souvent en pointe, la France a beaucoup de mal à développer ensuite un outil de production sécurisé permettant de répondre aux besoins en matériaux critiques de ses industriels.

Il est donc indispensable de réfléchir à la question suivante :

N'est il pas dangereux de dépendre de l'étranger pour l'approvisionnement des matériaux optiques critiques nécessaires à la réalisation de systèmes spatiaux ou de défense, car l'accès à certains de ces matériaux peut être bloqué, du jour au lendemain, sans préavis et sans recours possible ?

7.1.3 les composants optique diffractants

(voir rapport détaillé de B.Kress et O.Parriaux,Tome 2, § 5.6)

L'optique diffractante englobe une grande variété d'éléments basés sur la diffraction d'une onde électromagnétique incidente, par opposition aux éléments réfractifs ou réfléchissants basés sur la réfraction et la réflexion de la lumière. L'optique diffractante fait partie de ce que l'on désigne comme la micro-optique ou les micro-technologies de par la taille de ces éléments (millimétriques en général) et des microstructures dont ils sont composés qui sont de

l'ordre de grandeur de la longueur d'onde de l'onde incidente électromagnétique que l'on veut traiter. Il est possible de classer les composants de ce domaine en 5 catégories :

- *DOE*, pour les éléments optiques diffractants,
- *CGH*, pour les composants holographiques calculés donc de type numérique,
- *éléments hybrides*, de type analytique réalisés sur des composants traditionnels,
- *éléments dynamiques*, basés sur la technologie MEMS,
- *sub-longueur d'onde*, qui nécessitent l'utilisation de la théorie électro-magnétique pour décrire leurs propriétés optiques.

7.1.3.1 Méthodes et outils de conception et procédés de fabrication

Au niveau théorique, la plupart des problèmes de fond ont été résolus et les groupes français y ont été pour beaucoup (Université Louis Pasteur, Laboratoire Fresnel, LASMEA de Clermont-Ferrand et l'IOTA). Un seul logiciel (développé et commercialisé par Diffractive Solutions, Strasbourg) à notre connaissance englobe la conception, la simulation et l'analyse de tolérancement des 3 premières catégories d'optique diffractives par l'utilisation de la théorie scalaire et semi-scalaire, ainsi que la génération des fichiers de fabrication aux standard de la microlithographie ou de l'usinage diamant pour toutes les 5 catégories d'éléments diffractifs. Ce logiciel est développé et commercialisé par Diffractive Solutions, Strasbourg. Il reste cependant encore des problèmes théoriques de fond dans les cristaux photoniques, particulièrement en présence de métal. Les enjeux sont grands car il s'agit de fonctions de filtrage avec retombées attendues dans les écrans plats, les vitrages intelligents.

Au niveau technologique, le problème de la fabrication des éléments diffractants et des réseaux est celui qui conditionne l'entrée de ce domaine dans la société industrielle. Or, beaucoup reste à faire. Depuis quelques années, des recherches ont été menées pour développer une technique de lithographie dite de « grey-scale », qui en une seule étape de lithographie conduit à un relief quasi-analogique sur le substrat. Cette technologie s'appuie sur l'élaboration de masques à niveaux de gris par des technologies qui utilisent des nouveaux matériaux ou procédés du type HEBS de Canyon Materials (San Diego), High Energy Beam Sensitive glass) ou encore Se-Ge de Aerial Imaging (San Jose) (resist inorganique de type Se-Ge). Mais ces efforts restent académiques et sont encore rarement exercés dans l'industrie.

Il est donc primordial pour arriver à un produit final de rapport qualité/prix intéressant (et viable commercialement), de maîtriser parfaitement la technique de fabrication (usinage diamant, lithographie binaire, lithographie grey-scale) ainsi que la technologie de fabrication (stepper ou aligneur de masques, usinage ionique ou plasma, etc.), ses qualités et ses limitations.

7.1.3.2 Compromis technologiques et coût de fabrication

Ce point important est détaillé dans le rapport complet cité plus haut.

7.1.3.3 Les perspectives de l'optique diffractante et la situation en France

Le potentiel de fabrication des DOE en France est relativement faible. Concernant les réseaux dispersifs traditionnels, Jobin & Yvon a une position de force sur le marché international tout comme Hologramme Industries. Par contre en matière de « réseaux complexes » à base de micro-structures et de profil sub-longueur d'onde, plusieurs laboratoires sont à même de

réaliser des structures expérimentales de l'ordre de quelques dizaines de nanomètres (LTSI, LPM, LETI, LEOM) mais il n'existe pas de fonderie.

7.1.3.4 Recommandations

Concernant les DOE, CGH et hybrides :

- *favoriser l'exploitation du potentiel existant en théorie/modélisation en relation avec les industriels de manière à disposer d'outils prenant en compte les contraintes liées à la production et aux équipements,*
- *effort national ou européen pour élaborer une solution à la lithographie « gray-scale » de haute résolution pour éléments efficaces et de grande ouverture,*
- *développer le secteur des matériaux à haute résolution pour atteindre un niveau industriel à partir des compétences en photochimie et en polymères.*
- *- création d'un pôle national pour le manufacturing de DOE/CGH en liaison avec le potentiel de la microélectronique et visant à disposer des nouveaux outils industriels de fabrication pour ces composants optiques spécifiques.*

Concernant les éléments sub-longueur d'onde :

- *remplir le fossé entre potentiel théorique brillant et applications industrielles,*
- *développer le potentiel des réseaux résonnants et sub-longueur d'onde,*
- *développer un potentiel technologique de micro-structuration sub-micronique ouvert avec possibilités vers les grandes surfaces et sur tout type de formes de substrats,*
- *développer les techniques de moulage de microstructures dans des matériaux synthétiques aux meilleures propriétés thermo-mécaniques comme les sol-gels.*

7.1.4 Les composants optiques plastiques

Les matériaux polymères sont utilisés depuis de nombreuses années pour la réalisation de composants optiques, destinés aussi bien à l'instrumentation qu'aux secteurs de la sécurité (visières de casque, lunettes de sécurité) qu'aux verres correcteurs pour la lunetterie et de plus en plus dans les systèmes d'éclairage et de phares automobiles (cf. les applications non instrumentales)

Les variétés de matériaux polymères couramment utilisés sont en nombre limité. Il s'agit d'une part du PMMA ou "Plexiglass" et du CR39 qui ont un caractère thermodurcissable et sont mis en œuvre par coulée suivie de polymérisation, et d'autre part du Polycarbonate qui a un caractère thermoplastique permettant la transformation par injection.

7.1.4.1 Les composants optiques pour l'instrumentation et la Sécurité

Si de tels composants sont produits depuis les années 60, la réalisation de composants présentant une qualité optique suffisante pour être utilisés dans les équipements optiques implique une maîtrise particulière des procédés par injection ou par moulage des matériaux polymères, ainsi que dans la réalisation des moules.

En France, seules deux entreprises (GAGIONNE et SAVIMEX) se sont spécialisées dans la production de série de composants optiques en plastique de précision. Le reste de l'industrie plasturgique française ne semble pas s'intéresser à ce marché et les formations de cadres n'abordent pas les spécificités de cette branche. Le nombre limité de matériaux plastiques ayant de bonnes caractéristiques optiques, réduit les possibilités de calculer des systèmes optiques complexes (gamme d'indice de réfraction et de constringence plus réduite qu'avec les verres minéraux) Les sauts technologiques dans le domaine des composants optiques plastiques sont à rechercher dans les axes suivants :

- La synthétisation de nouvelles molécules permettant d'élargir le domaine des indices et des constringences accessibles, tout en conservant d'excellentes qualités de transparence, homogénéité et clarté. Cependant une des difficultés majeures est d'intéresser les industriels de la chimie à de telles niches technologiques correspondant à des tonnages réduits, ce qui n'est pas le cas de l'industrie française ou Européenne, laissant un avantage à l'industrie japonaise.

- L'utilisation de nouveaux moyens d'usinage optiques ou mécaniques de très haute précision pour l'usinage direct à partir d'ébauches en résines thermodurcissables, ou pour la réalisation des moules d'injection pour les résines thermoplastiques. En particulier, les techniques d'usinage à la pointe diamant permettent maintenant la production en série de composants asphéro-diffractifs pour le visible, ce que l'on ne peut toujours pas réaliser actuellement en verre.

7.1.4.2 Les "verres organiques pour l'ophtalmologie

La réalisation, de façon maîtrisée, des premiers verres de puissance par procédés de coulage suivi d'une polymérisation est assez récente, et a été réalisée en France. C'est sur la base de ces procédés que la société ESSILOR a développé sa position de leader mondial dans les verres organiques.

Depuis 1980, s'est développée une intense activité de R&D pour la mise au point de matériaux plus "performants", correspondant à des compromis entre les performances pour le porteur de verres et celles pour le fabricant et l'opticien, tout en tenant compte d'un impératif de prix de revient raisonnable.

En ce qui concerne les résines thermodurcissables, les recherches se sont d'abord portées sur l'élévation de l'indice de réfraction n . Ce sont surtout des sociétés chimiques Japonaises qui ont permis les progrès réalisés dans ce domaine. Il existe maintenant des matériaux à "haut indice" ($n=1.59$ à 1.6), et encore plus récemment à "très haut indice" ($n=1.67$ à 1.75), permettant de réaliser des verres plus minces et donc plus légers.

En ce qui concerne les résines thermoplastiques, leur utilisation s'est développée grâce aux progrès réalisés depuis les années 1980 dans les domaines des vernis comme revêtement de protection aux rayures et aux solvants.

Pour aller plus loin, il est maintenant nécessaire de considérer le verre ophtalmique comme un système complexe comprenant le substrat en matériau polymère, revêtu d'une superposition de couches minces ayant chacune une fonction bien spécifique.

C'est dans le cadre de cette approche globale qu'il n'est pas interdit de penser que les verres de lunettes pourront également devenir des verres "intelligents".

Les axes de R&D concernent également la mise au point, ou l'adaptation, de nouveaux procédés de réalisation d'un verre fini. En particulier, on cherche à réaliser l'adaptation finale des prescriptions au plus près du client final. C'est ainsi que se sont développées, ces dernières années, des technologies " d'usinage direct" de verres progressifs, utilisant des techniques d'usinage à la pointe diamant et de polissage à galets organiques. Plus récemment encore, commencent à apparaître des procédés de moulage rapide basés sur les techniques de la stéréolithographie.

Enfin les progrès réalisés dans les techniques d'usinage optique et de dépôts de couches minces dures permettent de faire évoluer les technologies de réalisation des moules progressifs pour en augmenter la durée de vie, réduire leurs coûts et les temps de cycle d'injection.

7.1.4.3 Recommandations.

On voit donc que ce secteur d'activité industriel, où la France occupe en particulier une position très forte dans le secteur de la lunetterie, se doit d'évoluer technologiquement en permanence. Il doit donc pouvoir s'appuyer sur les nombreuses compétences en recherche développées en France dans des domaines tels que: les couches minces, la chimie des matériaux polymères, les sols gels, etc... .

Il doit aussi pouvoir s'appuyer sur une recherche forte et pérenne dans le domaine des techniques d'usinage optique et il a aussi besoin de disposer de personnels formés à ces techniques d'usinage.

Par contre ce secteur est très sensible aux contraintes d'accès à de nouvelles molécules, compte tenu des règles imposées à leur entrée dans les pays de la communauté européenne, qui entraînent des tests longs et coûteux. Ces directives donnent un avantage certain à des concurrents n'ayant pas les mêmes contraintes et qui gagnent un temps précieux pour le développement et l'industrialisation de nouveaux produits. Or il semble que ces directives soient transposées de manière stricte en droit français, contrairement aux pays du nord de l'Europe où l'application des normes est plus pragmatique.

Enfin le rapport sur la compétitivité de la plasturgie française dans l'Union Européenne, établi pour la DiGITIP, bien que faisant une large part à l'innovation, aux progrès technologiques et aux liens entre scientifiques et industriels, ne parle jamais de l'apport de l'optique ni de ses applications actuelles et à venir. Cela montre bien qu'il y a encore de gros efforts de sensibilisation à réaliser auprès d'autres filières industrielles.

7.1.5 Les couches minces optiques

(Pour plus de détails se reporter aux documents en annexe)

Les couches minces optique ont pour effet de transformer les caractéristiques de base des substrats sur lesquels elles sont déposées et ce sont les fonctionnalités qu'elles apportent qui donnent au composant ses vraies caractéristiques opérationnelles. En ce sens on peut dire qu'elles permettent de "rendre intelligente" une surface, donc leur usage s'accroît ce qui entraîne un besoin fort, si ce n'est croissant, en R&D pour les technologies associées.

On peut donc considérer que les couches minces sont une activité stratégique pour nombre d'applications et de marchés du domaine de l'optique, mais simultanément les composants laissent de plus en plus la place aux systèmes et la couche mince devient de moins en moins visible, et il devient très difficile de financer une activité de recherche sur un problème de couches minces.

7.1.5.1 La position actuelle de la recherche en France

Vue de l'extérieur, la communauté française des couches minces apparaît comme peu structurée et peu reconnue. D'une part le nombre des acteurs est réduit et d'autre part les couches minces sont perçues comme une technologie de sous-traitance avec un faible potentiel d'innovation. En conséquence, cette filière n'apparaît pas comme une priorité du point de vue académique et par suite elle ne bénéficie que de peu de soutien.

La réalité est heureusement à l'opposé de cette vision extérieure, et les grands programmes, qui font ressortir des liens directs entre les performances du dispositif et celles d'un ensemble de couches minces, restent toujours salutaires au développement de cette filière.

Les exemples sont nombreux pour le prouver: les anti-reflets I.R et les couches DLC pour les équipements aéronautiques de défense, les performances de tenue aux flux laser intenses dans les programmes DGA puis sur les chaînes laser de mégajoule, la mise au point des couches pour le programme VIRGO avec leurs niveaux d'absorption et de diffusion

inégales dans le monde, les avancées dans les techniques de pulvérisation ionique ou cathodique magnéton pour les applications en lithographie EUV du programme PREUVE et l'imagerie solaire EUV en astrophysique spatiale, les avancées liées aux programmes spatiaux du CNES et de l'ESA, l'apparition des couches minces sol gel dans mégajoule avec la réalisation des pièces de grandes dimensions de la LIL à Saint Etienne, etc. ...

Les comparaisons que l'on peut faire au travers des congrès, publications, etc. ..., montrent que la recherche française ne présente pas de déséquilibre flagrant vis-à-vis d'autres pays (chacun ayant toutefois des points forts). Il n'en est pas de même au niveau industriel, dans des domaines comme les télécommunications par exemple, où de forts potentiels de production se sont développés aux USA, au Japon, en Allemagne, en Grande Bretagne et même en Chine.

Cette recherche en couches minces reste toutefois concentrée dans un nombre très restreint de laboratoires universitaires, d'écoles d'ingénieurs ou de grands organismes publics (CEA et CNRS en particulier), ainsi que dans les services couches minces des principales entreprises françaises disposant de moyens de production de composants optiques de hautes technicités. Par contre les PME spécialisées investissent peu dans des programmes d'innovation technologiques, à l'exception sans doute de la société HEF (Loire) dans le domaine de la pulvérisation cathodique, et de sociétés comme Highwave/Cilas (Aubagne) dans le domaine des "filtres photoniques".

De façon générale, les techniques industrielles de traitements à vocation optique sont plutôt restées, en France, de type traditionnelles, c'est-à-dire basées sur l'évaporation sous vide, assistée ou non par bombardement ionique.

Enfin, la France semble avoir pris un certain retard sur des pays tels que les USA, le Japon ou la Grande Bretagne dans des domaines de traitements plus particuliers tels que les filtres localisés pour applications spatiales, des filtres passe bande très étroits pour les télécoms, et les traitements IR sur certains matériaux en bande II ou III.

Il faut remarquer que dans cette filière, où la recherche a été essentiellement pilotée par des activités militaires ou spatiales (et jusqu'à présent très peu par des applications grand public), les financements et les contraintes de confidentialité de ces types de marché ont conduit au développement d'équipes de recherche industrielles relativement autosuffisantes, ce qui ne favorise pas un cheminement classique de l'amont vers l'aval, des laboratoires de recherche vers les industriels.

Encore maintenant, les habitudes de travail, acquises dans le passé, ne semblent toujours pas propices au décloisonnement de la R&D et à une collaboration entre laboratoires de recherche publics et industriels, d'autant plus que l'on pouvait constater, il y a encore quelques années, une situation de quasi concurrence entre certains laboratoires publics et les équipes de R&D des groupes industriels ce qui faisait perdre beaucoup en efficacité au système. Il semblerait que cette situation soit en très grande partie résolue maintenant.

Malgré toutes ces difficultés (souvent liées à des raisons historiques) les liens existent entre laboratoires publics et laboratoires industriels, et un certain nombre de transferts technologiques sont réalisés, mais sûrement de façon insuffisante.

7.1.5.2 Les axes de développement pour les années à venir.

Une liste plus exhaustive des axes de développement est fournie dans les documents en annexe. Ils portent aussi bien sur les nouveaux process de dépôt que sur l'amélioration des performances des empilements ou le développement de nouveaux produits et ceci pour de nombreux secteurs d'applications.

L'axe des "filtres actifs, permettant d'ouvrir de nouveaux champs d'applications, mérite d'être soutenu.

Les développements dans le domaine des sols gels, avec leurs fonctionnalités spécifiques (liées à la structure de ces matériaux) ouvrant un spectre très large d'applications dont de nombreuses applications grand public, méritent d'être soutenus et développés. De nombreux laboratoires français (CEA/Le Ripault, LTSI, Mulhouse, Labo X de Boileau...) travaillent sur ces nouveaux procédés assez équivalents à des matériaux synthétiques dont les propriétés thermomécaniques sont supérieures à celles des polymères et dont la composition ou les méthodes de greffage des composés inorganiques permettent d'adapter les propriétés optiques de ces couches. Dans l'avenir on pourrait espérer disposer de nouveaux matériaux à transmission spectrale adaptée, ou photoréticulables ou matriçables...

De plus ces technologies de dépôt présentent de nombreux avantages de souplesse, et permettent de synthétiser des solutions ultra pures, des particules fonctionnalisées, des phases cristallines particulières, ... et de conserver les propriétés synthétisées au niveau des couches réalisées.

Il faut de plus noter l'existence opérationnelle de la plate forme "sols gels" de Saint Etienne qui, par les dimensions qu'elle peut traiter permet de faire des mises au point et du transfert technologique de nouvelles couches en vraie grandeur. De tels outils, en étant soutenus, peuvent permettre à l'industrie française de rattraper son retard sur ce qui se passe aux USA, en Allemagne, en Australie et au Japon où ces technologies sont beaucoup plus développées.

Enfin, l'enjeu économique associé à la lithographie X-UV, encore en phase de pré développement, justifie la poursuite d'efforts de recherche importants sur les traitements des masques et des couches réfléchives, ainsi que sur l'amélioration des procédés et méthodes de contrôle afin d'obtenir un niveau le niveau de qualité "zéro défauts" qui sera exigé dans la future compétition industrielle. Ces travaux doivent permettre également de réaliser les optiques spécifiques et performantes des nouvelles sources de rayon X, le diagnostic des plasmas chauds et pour les programmes spatiaux d'observation solaire dans ce domaine spectral.

7.1.5.3 Recommandations

Il serait souhaitable qu'un plus grand rapprochement s'effectue entre laboratoires de recherche publique et laboratoires industriels, et ceci malgré le passé, pour augmenter l'efficacité globale de la recherche dans la filière des couches minces.

A cet effet les bourses co-financées CNRS-Industries sont un excellent vecteur de transfert technologique, mais aussi de rapprochement et de compréhension mutuelle. Il faut donc les favoriser.

Une autre possibilité, permettant de mieux structurer et de donner une meilleure lisibilité de cette filière, consisterait à créer un groupement de Recherche Spécifique (type GDR couches minces), intégrant les acteurs industriels et académiques.

Il est nécessaire de rééquilibrer les efforts financiers associés à la recherche au niveau des technologies axées sur les composants comparativement aux efforts donnés aux études systèmes. Les financements du ministère pourraient permettre de soutenir des programmes d'études sur une problématique couches minces.

Par ailleurs, des centrales technologiques de premier ou deuxième rang (au sens MEN) pourraient être rapidement déclarées, compte tenu du potentiel unique existant chez

certaines acteurs français, comme cela est déjà en train de se concrétiser avec la mise en place de la "centrale d'élaboration et de métrologie d'optique X d'Orsay", et en s'appuyant sur les pôles de ressources de l'Institut Fresnel de Marseille et du laboratoire TSI de Saint Etienne (plate forme sol gel) entre autres .

7.1.6 Les procédés de production et les matériaux pour les applications non instrumentales

Les verres trouvent également de nombreuses applications dans des domaines souvent très éloignés de l'instrumentation optique, mais qui intéressent des activités grand public et donc sont à la source de productions industrielles importantes.

Comme nous allons le voir, les entreprises travaillant dans ces secteurs se doivent, pour conserver des positions fortes à l'international, d'être toujours à la recherche de nouvelles solutions techniques pour répondre aux nouvelles attentes de leurs marchés, en permanente évolution, aussi bien en terme de fonctionnalité qu'en terme d'esthétisme.

En conséquence ces entreprises mènent des travaux importants de R&D dans de nombreux domaines tels que les matériaux et leurs micro structuration, les techniques de traitements optiques de surfaces, les techniques de contrôle optique, les process de découpe ou d'assemblage par faisceau laser, etc.

7.1.6.1 Les secteurs d'activité et la position de la France

Les secteurs d'activité concernent en particulier le bâtiment, l'automobile, l'électroménager, mais aussi les productions de flacons pour les produits de luxe (secteur très technique et en forte croissance).

Dans ces secteurs la France occupe une solide position industrielle due en particulier, mais pas uniquement, à des groupes tels que Saint-Gobain (qui dispose en France d'un important centre de recherche) ou Valeo.

7.1.6.2 Les évolutions récentes dans les domaines des matériaux

Les évolutions dans le secteur des composants en verre pour l'automobile (pare brise, toit, vitres) portent sur la recherche de nouvelles couleurs pour des raisons esthétiques, et sur l'amélioration des caractéristiques anti-solaires. De nouveaux axes doivent être explorés tels que l'inclusion de nano particules ou la recherche de nouveaux traitements anti-solaires visuellement non réfléchissants.

Dans le secteur des blocs optiques d'éclairage (phares), la mise au point de nouveaux matériaux plastiques va conduire à un remplacement progressif des verres, impliquant pour les entreprises concernées de se reconvertir.

L'industrie du flaconnage de luxe cherche à mettre au point des verres présentant de nouvelles couleurs, mais surtout des effets visuels sophistiqués, et pour cela les travaux de R&D s'orientent vers des matériaux structurés à des niveaux de la longueur d'onde en surface ou en interne.

Toutes ces recherches impliquent également des développements extrêmement sophistiqués de nouveaux codes de modélisation des matériaux structurés . Ces travaux sont menés en partie dans les centres de recherche industriels qui travaillent en très forte collaboration avec les laboratoires universitaires et surtout le "laboratoire d'optique des solides" de Paris 6

7.1.6.3 Les évolutions récentes au niveau des traitements de surface

Les couches minces sont de plus en plus utilisées dans ces secteurs d'activité et les fonctionnalités nouvelles conduisent à des dépôts de plus en plus complexes (> 20 couches) à

réaliser sur de grandes surfaces. Les fonctions recherchées couvrent les domaines spectraux du visible et de l'I.R avec de contraintes d'effets visuels particuliers.

Les technologies de production restent classiques (évaporation sous vide), mais les travaux de R&D portent là aussi sur le développement de codes de calcul appropriés et au développement d'outils de prototypage virtuel.

Les évolutions des technologies sols gels pourraient offrir des voies originales, ces matériaux pouvant offrir de nouvelles fonctionnalités telles que la micro ou la nano structuration de surface, l'obtention d'effets colorés ou d'irisation.

7.1.6.4 Autres axes de développement

La recherche de nouveaux produits de vitrages actifs offre de nouveaux axes de recherche tels que le maintien en suspension de particules de cristaux liquides dans les polymères, les effets électrochromes, etc...; Les techniques de structuration à échelle millimétrique permettent le développement de nouveaux panneaux permettant de rediriger la lumière dans les bâtiments.

7.1.6.5 Recommandations

Les recommandations du paragraphe 7.1.3.3 pour l'optique plastique s'appliquent également à ces secteurs d'activité, dont le poids industriel en France est important.

7.2 Deuxième partie – L'offre de l'optique dans les procédés de fabrication

Dans cette partie de ce chapitre sur les procédés de fabrication, nous souhaitons aborder l'utilisation des faisceaux lumineux comme outil de transformation de la matière, et plus particulièrement l'utilisation des faisceaux laser, sous toutes leurs formes, dans les process de transformation des industries manufacturières en particulier sans aborder les utilisations des faisceaux laser dans les domaines de la métrologie, de la télémétrie, du pointage ou de la lecture optique en audio/vidéo grand public, qui sont abordées dans d'autres chapitres). Nous aborderons également les apports de l'optique dans les procédés de stéréolithographie et de prototypage rapide qui ont pris, ces dernières années, une importance grandissante dans le domaine industriel, mais où la France est peut être de moins en moins présente.

7.2.1 L'offre des lasers comme outils industriels de transformation de la matière

Pour aborder ce secteur d'activité, un groupe de travail a été créé au sein du "club laser et procédés", association regroupant un très grand nombre d'acteurs concernés par cette problématique (fabricants de laser, fabricants de machines, industriels utilisateurs, centres de recherche, centres de transfert de technologie ou de formation,...). Ce groupe de travail, représentant l'ensemble des grands centres hexagonaux, a rédigé un document très complet qui est joint en annexe à ce rapport.

Dans ce chapitre nous ne ferons qu'une synthèse des points les plus représentatifs ou critiques de cette étude et des recommandations faites par le groupe de travail.

7.2.1.1 Les procédés de fabrication par laser

a) Les processus d'interaction laser matière et les avantages du laser

Les connaissances scientifiques concernant l'interaction laser-matière n'ont malheureusement pas connu le même essor que les technologies laser et ses technologies connexes. Ceci s'explique par l'extrême complexité des processus mis en jeu, et la

compréhension de ces processus est un travail de longue haleine nécessitant des compétences pluridisciplinaires.

Les paramètres à prendre en compte pour réaliser un traitement laser sont très nombreux. C'est en fonction de ces paramètres et de la nature de la cible que l'on peut déterminer le type d'interaction et le résultat final du traitement laser.

Dans la majorité des cas le processus est *thermique*. L'usinage est rapide mais s'accompagne d'effets collatéraux significatifs. Il correspond généralement à des sources laser type CO₂, Nd/YAG ou diodes. Le processus peut être *photochimique* (on parle de *photoablation*) avec des lasers UV, et dans ce cas les effets de bord sont réduits, voire non significatifs. Enfin on parle de processus *athermique* pour les lasers à impulsion ultra courte (pico et femtoseconde) qui permet de réduire notablement les effets thermiques sur la plupart des matériaux.

Il est à noter que les processus *photochimiques* et *athermiques* correspondent à des technologies laser plus récentes, donc plus onéreuses, moins fiables et souvent moins productives, dans l'état actuel de leur développement.

Il y a quelques années encore le laser était perçu comme un procédé de remplacement aux techniques d'usinage et d'assemblage plus conventionnelles. La tendance actuelle consiste à prendre en compte l'usinage laser dès la conception de la pièce de façon à l'optimiser vis à vis de ce nouvel outil de production et d'en tirer un profit maximum. La qualité et la flexibilité de l'usinage laser permettent de s'affranchir de bons nombres d'étapes de pré ou post-traitement, de contrôle qualité dans un procédé de fabrication. En ce sens, le laser apporte un réel gain en coût et temps de production. Le laser apporte également de nouvelles possibilités en terme d'usinage, en marquage interne ou en micro usinage par exemple.

Dans la plupart des cas le traitement laser est sans contact, ce qui permet de s'affranchir des problèmes liés à l'usure de l'outil ou d'envisager l'usinage d'objets très fragiles.

Le laser concerne aujourd'hui des applications niches qui se justifient pour des considérations de faisabilité, de flexibilité, de rapidité, de gain en performance ou de coût.

b) Les procédés d'assemblage par laser

Le soudage laser. Procédé consistant à assembler 2 pièces par fusion et interpénétration des matériaux, avec ou sans apport de matières. Il donne une zone affectée thermiquement réduite par rapport aux techniques conventionnelles. Suivant le cas on utilise des lasers continus ou pulsés. Les axes d'amélioration portent sur le développement de procédés hybrides TIG/laser ou MIG/laser.

L'assemblage de thermoplastiques par laser. Procédé, mis au point depuis quelques années seulement, fonctionnant par transparence sur deux pièces polymères bridées. Le faisceau laser est absorbé par un matériau sous jacent au niveau de l'interface, et l'échauffement contrôlé des deux matériaux conduit à l'interpénétration des chaînes polymères. Ce procédé est précis, rapide et très flexible, mais il implique de choisir les matériaux en conséquence. On utilise des lasers à diode ou des lasers Nd:YAG.

c) Les procédés d'usinage laser

La découpe laser. Procédé consistant à réaliser une découpe partielle ou totale d'un matériau selon un motif prédéfini, découpe qui peut être à plat ou en 3D. Le processus est

principalement thermique. Suivant les épaisseurs on utilisera des lasers continus (CO₂ ou Nd:YAG) ou des lasers impulsions (Nd:YAG). La découpe laser, utilisée sur de nombreux matériaux, est bien implantée au niveau industriel.

Le perçage laser. Procédé consistant à percer un matériau sous l'action d'un rayonnement laser, généralement pulsé de type CO₂ ou Nd:YAG. Les technologies actuelles ne permettent pas de répondre à tous les besoins en terme de perçage profond (> 1 mm) et une des problématiques contemporaines non résolues est le perçage d'injecteurs pour moteurs automobiles à injection directe.

Le marquage laser. Procédé qui consiste à produire localement un contraste sur la cible par divers procédés (enlèvement de matière, carbonisation, changement de pigmentation, dépolissage, mise à jour d'une sous couche, changement d'indice de réfraction, fusion de poudre d'encre, etc.). Il peut être superficiel, profond ou interne. Les cadences atteintes sont élevées. Les applications sont nombreuses: identification, traçabilité, authentification, décoration, etc...

Le prototypage rapide. Procédé consistant à créer un objet tridimensionnel en utilisant le faisceau laser pour fondre localement une poudre métallique (frittage laser) ou pour polymériser une solution monomère (stéréolithographie). Le frittage laser nécessite en général une finition par usinage mécanique.

La microlithographie. Procédé consistant à graver une tranche de silicium avec une résolution submicronique. Ce procédé de gravure est couramment utilisé en production microélectronique avec des résolutions de plus en plus importantes et on atteint en production des résolutions de 90 nm avec des lasers eximères ArF ($\lambda = 193 \text{ nm}$). Les principaux fabricants de sources et de machines sont américains. Ce domaine va être pleinement concerné par les changements technologiques liés au passage à la longueur d'onde de 13.5 nm (lasers à rayons X). Plusieurs programmes de recherche académique et industrielle sont en cours au niveau des sources et des optiques adéquates. La région de Grenoble accueille un site majeur dans le domaine de la microélectronique tant au niveau académique qu'industriel.

Le micro usinage. Procédés consistant à réaliser un motif dont la dimension ou les tolérances sont à l'échelle du micron, ce qui implique obligatoirement de minimiser les éventuelles dégradations de la cible.

Différentes sources peuvent être utilisées:

- laser à rayonnement IR – interaction thermique donnant un usinage rapide
- laser à rayonnement UV – interaction photochimique avec des épaisseurs mises en jeu de l'ordre du micron. L'usinage est plus lent, mais la résolution est supérieure. De plus ce procédé est limité à des matériaux absorbants à la longueur d'onde du laser.

Les lasers à impulsions brèves (picoseconde) et ultra brèves (femtoseconde) permettent de limiter les effets collatéraux et on parle d'usinage athermique, mais les épaisseurs d'usinage sont de l'ordre du micron et l'usinage est lent.

Les procédés de micro usinages laser sont présents au niveau industriel, mais ils sont encore freinés par le coût élevé des sources et leur faible productivité. L'accroissement des fréquences de répétition observées chez plusieurs constructeurs de lasers UV ou femtosecondes est une voie d'avenir pour augmenter la productivité de ces procédés.

Les applications industrielles actuelles se justifient généralement pour des considérations de faisabilité (applications nouvelles) ou de performance (la qualité d'usinage requise n'est

atteinte que par cette technologie). La tendance à la miniaturisation conduit à un développement inévitable du marché du micro usinage laser.

d) les procédés de traitement ou modification de surface par laser

Traitement de surface. Procédé consistant à apporter ou à améliorer une ou plusieurs propriétés de surface par un traitement laser (refusion superficielle, rugosité, dépoli, modification d'indice, texturation de surface, etc..).

Rechargement. Procédé consistant à fondre localement un métal d'apport (fil ou poudre) sur une surface pour remplacer de la matière manquante ou pour créer un revêtement superficiel modifiant les propriétés (anti-abrasif, anti-corrosion, anti-érosion, barrière chimique, etc...).

Les applications du procédé sont encore très récentes, mais présentent un fort potentiel.

Nettoyage // Décapage de surface. Procédé consistant à éliminer une couche superficielle par ablation thermique, photoablation, et par effet photo- acoustique (utilisé pour la rénovation de bâtiments historiques et le nettoyage de moules d'injection).

Dépôts par ablation laser. Procédé consistant à réaliser un dépôt à partir du panache d'ablation. Ce procédé, étudié dans plusieurs laboratoires universitaires Français, reste jusqu'ici au stade de laboratoire. Les applications potentielles visées: fabrication de composants pour MEMs, réalisation de films à stœchiométrie complexe, etc.

7.2.1.2 le marché actuel du laser industriel en France (2002)

- La part du laser sur le marché mondial de la machine outil représente 10% et pèse 4 milliards d'Euro :
 - 50% pour les applications macro et 50% pour les applications micro (en hausse)
 - 50% du marché pour la découpe et le soudage, 30% pour le marquage et 15% pour le micro usinage

La croissance annuelle du marché est estimée à 15-20% pour la période 2002-2006.

L'Europe regroupe 40% des 195.000 lasers industriels recensés au niveau mondial.

D'une manière générale, le marché du laser industriel en France est mal connu (beaucoup d'acteurs non identifiés) et peu développé par rapport à nos voisins allemands, italiens et anglais, ce qui ne donne pas une base suffisante pour le développement et la croissance des sociétés françaises fabricant des sources ou des machines laser, contrairement à ce que l'on peut observer en Allemagne par exemple, et ceci d'autant plus que les entreprises françaises de l'aéronautique et de l'automobile utilisent peu ces techniques (contrairement à nos voisins européens).

Cependant l'innovation dans le domaine du laser est porteuse d'activités.

Il apparaît donc stratégique de soutenir ces actions innovantes pour pérenniser et développer ces nouvelles activités, en particulier les sources laser et aussi les procédés liés aux micro technologies.

7.2.1.3 Etat actuel des recherches académiques et industrielles

a) les enjeux actuels

(Pour plus de détails se reporter au rapport en annexe)

Développer le marché et les produits

Il y a toujours eu en France, des compétences en développement laser à la fois dans le milieu scientifique et industriel, malheureusement pour une raison qui nous échappe ce savoir-faire et ces connaissances théoriques ne percent pas et ne donnent pas lieu à une activité industrielle d'envergure. Il en est de même au niveau des applications du laser. Inverser cette tendance est donc un enjeu majeur.

Concevoir et produire des sources moins chères et plus fiables

Les diodes laser et le laser CO2 répondent aux critères imposés par les industriels (simplicité, fiabilité, performance, faible coût), ils sont et resteront pendant les années à venir largement diffusés dans l'industrie. Certaines technologies, au contraire, ne sortiront pas des laboratoires et le laser excimère se maintiendra car il est utilisé de façon exclusive dans certaines niches (micro lithographie et chirurgie réfractive).

Les lasers doivent aussi être de plus en plus fiables et exiger des coûts de maintenance réduits. Le pompage par diode laser est donc une évolution majeure qui va dans ce sens.

Pérenniser les développements récents dans les microtechnologies

Il est peu probable que la France rattrape son retard au niveau des procédés macroscopiques, par contre le positionnement de la recherche et de l'activité industrielle sur les procédés microscopiques est en train de se jouer maintenant, au niveau européen et au niveau mondial. Compte tenu du potentiel de recherche et de la capacité d'investissement des industries allemandes (et dans une moindre mesure italiennes et anglaises) il paraît crucial de soutenir les efforts de développement français dès aujourd'hui, afin d'aider les acteurs de la filière photonique à se maintenir et à s'imposer comme incontournables dans les domaines des procédés microscopiques (recherche fondamentale, recherche appliquée, transfert de technologie, fabrication de laser, fabrication de machine laser, sous-traitance).

b) les thèmes en développement – sources laser

(Pour plus de détail voir le rapport en annexe)

L'avenir des procédés laser est lié au développement des sources et à leur fiabilité :

Laser à diodes

Laser à impulsions ultra courtes pompé par diodes (pico et femtoseconde). Ces sources vont atteindre des niveaux de performance et de fiabilité qui permettent d'envisager de véritables applications industrielles dès que leur coût baissera. C'est sans doute le secteur amené à subir la plus grande croissance dans les années à venir.

Laser à disque

Laser à fibre – il faut s'attendre à une place importante dans le domaine pour l'ensemble des lasers à fibre.

Laser excimère forte puissance à commutation solide (sans thyatron) pour augmenter leur fiabilité.

c) les thèmes de développement - Procédés laser

Les travaux actuels sur le développement des procédés laser suivent plusieurs tendance :

- *La miniaturisation* qui conduit aux procédés de micro fabrication
- *Les procédés hybrides* qui bénéficient de la synergie du laser et des procédés conventionnels pour accroître les performances et la souplesse des procédés monotecnologie;
- *La modélisation et la simulation des phénomènes d'interaction laser-matière*
- *Le contrôle qualité in situ* avec des techniques d'imagerie, acoustiques ou spectroscopiques.

Tous les domaines d'applications décrits plus haut font l'objet de travaux de développement qui sont décrits en détail dans le rapport en annexe et plus particulièrement dans les domaines suivants:

- *Le micro usinage*. Ce marché croît progressivement depuis 5 à 6 ans et de nouvelles niches d'applications s'affirment dans de nombreux secteurs de l'industrie. La précision et le caractère sans contact de l'usinage laser ouvrent la voie vers de nouvelles applications jusqu'à présent inaccessibles en terme de précision, de rapport de forme ou de non dégradation de la cible. De plus les impulsions ultra brèves permettent d'usiner n'importe quel matériau.
- *La microlithographie*
- *Le marquage interne* qui peut déboucher dans le marquage d'effets esthétiques, mais aussi et surtout dans la lutte contre les contre-façons.
- *L'usinage interne* utilisant les capacités des lasers femtoseconde
- etc.

7.2.1.4 Formations existantes et emplois attendus par le tissu industriel

Les emplois concernent tous les secteurs d'activité: automobile, aéronautique, agroalimentaire, capteurs, chimie, décoration, électronique, emballage, mécanique, optique, pharmaceutique, etc,... Le tissu industriel a besoin d'opérateurs, de techniciens et d'ingénieurs process, de docteurs-ingénieurs (R&D), d'ingénieurs en physique et développement laser, etc.

a) les formations initiales

Plusieurs universités proposent des formations professionnelles au niveau licence professionnelle, DESS, DEA, Master et quelques écoles d'ingénieurs proposent une option "laser" avec parfois des formations plus orientées vers les process.

Compte tenu de la maturité des technologies laser, il est étonnant que l'enseignement sur les technologies et les procédés laser ne soit pas plus intégré dans les écoles d'ingénieurs, ce qui fait que les décideurs de demain ne sont pas informés sur la technologie laser et ses potentialités.

b) Les formations continues

Des stages de formation liés à la technologie laser sont proposés dans plusieurs centres laser. Ils couvrent la plupart des besoins industriels.

Ce qui peut être reproché aux industriels acquérant une machine de production laser est de ne former son personnel qu'à l'aspect de la conduite de la machine, mais très rarement de le former au procédé. Il est donc nécessaire de mieux sensibiliser le secteur industriel à la nécessité d'une formation procédé pour tirer le meilleur profit de ses investissements.

7.2.1.5) Recommandations

a) Valorisation du tissu industriel

- *Soutenir le développement des lasers et des applications liés aux micro technologies. Il est peu probable que la France rattrape son retard au niveau des procédés macroscopiques, par contre le positionnement de la recherche et de l'activité industrielle sur les procédés*

microscopiques est en train de se jouer maintenant, au niveau européen et au niveau mondial. Compte tenu du potentiel de recherche et de la capacité d'investissement des industries allemandes (et dans une moindre mesure italiennes et anglaises) il paraît crucial de soutenir les efforts de développement français dès aujourd'hui, afin aider la filière photonique à se maintenir et à s'imposer comme des acteurs incontournables dans les domaines des procédés microscopiques (recherche fondamentale, recherche appliquée, transfert de technologie, fabrication de laser, fabrication de machine laser, sous-traitance) ;

- *Soutenir les développements civils au même titre que les développements militaires afin d'accroître les retombées économiques des futurs programmes gouvernementaux (paragraphe 1.3) ;*

- *Soutenir les quelques intégrateurs et fabricants de laser français car ils sont la base du tissu industriel dans ce domaine (Intégrateur = société intégrant un laser dans une machine spéciale pour répondre à un besoin industriel donné) ;*

- *Privilégier le développement de sources qui répondent à un réel besoin du marché (afin de ne pas reproduire les erreurs du passé).*

b) Transfert de technologies

- *Organiser et coordonner l'action des centres laser et encourager leur complémentarité (complémentarité en compétences et en équipements). Une meilleure coordination conduirait en outre à une meilleure utilisation des fonds publics. Cette coordination pourrait être assurée par le Club Laser et Procédés ou la Commission Nationale d'Optique et Photonique ;*

- *Favoriser les programmes de développement communs entre les centres laser et les utilisateurs ;*

- *Mettre en place des plate-formes technologiques thématiques mi-privé mi-public, regroupant partenaires industriels et scientifiques dans un même lieu, afin de dynamiser le transfert et le développement en commun des technologies lasers, des périphériques, des applications et de la connaissance scientifique. De telles structures seraient complémentaires des divers incubateurs et pépinières d'entreprises, en apportant un support technologique et une mise à disposition de matériels aux jeunes pousses ou jeunes filiales. Les centres lasers existants pourraient s'intégrer dans de telles structures ;*

- *Mettre en place des statuts administratifs et juridiques pour de telles plate-formes technologiques. Les structures existantes à l'heure actuelle se heurtent au manque de cadres administratif et juridique adaptés à une telle activité. Les statuts de ces plate-formes doivent permettre un fonctionnement souple (gestion des contrats, gestion du personnel) pour ne pas entraver la réactivité et l'activité de ces structures.*

- *Encourager l'adossement des centres et plate-formes technologiques à des laboratoires de recherche publics ou privés pour alimenter les connaissances et les savoir-faire de ces centres et plate-formes technologiques au fil des années et maintenir un bon niveau d'expertise.*

- *Modifier les conditions d'éligibilité des aides financières (nationales et régionales) de manière à ce que les centres techniques puissent participer au même titre que les laboratoires de recherche.*

c) Recherche

- *Soutenir les nouvelles thématiques lasers abordées dans les laboratoires (voir paragraphes 4.2 et 4.3 du rapport en annexe) ;*

- *Valoriser la recherche technologique au même titre que la recherche fondamentale au niveaux des institutions de recherche (Universités, CNRS, laboratoires associés aux grandes*

écoles). S'investir dans la recherche technologique et les collaborations industrielles ne doit pas être un frein à la carrière des chercheurs, enseignant-chercheurs ou ingénieurs ;

- Encourager les laboratoires à collaborer avec les industriels du domaine : fabricants de laser, fabricants de machines, utilisateurs.

d) Formation

- Développer la culture laser au sein des Universités et Ecoles d'ingénieurs en introduisant dans les cursus des cours théoriques et pratiques sur la physique des lasers, les lasers, les procédés laser ainsi que leur mise en œuvre. Une partie de cette formation pourrait être réalisée sur des machines laser industrielles (découpe, soudage, marquage, micro usinage ...);

- Coordonner et uniformiser les formations laser au niveau national ;

- Mettre en place des équipes de formation pluridisciplinaires (paragraphe 5.1) ;

- Développer et diffuser des outils pédagogiques à destination du grand public, des lycées, universités et écoles d'ingénieurs. Certains de ces outils existent déjà et sont à promouvoir : Cd-Rom sur la sécurité laser, maquettes éducatives illustrant les propriétés du rayonnement laser par des expériences simples, films illustrant les applications industrielles, diaporamas, exposition grand public « Le laser, un concentré de lumière... ». Citons également le projet (avorté) de la Région Grand Est pour la conception d'un lasermobile, camion contenant plusieurs machines laser pour en illustrer les potentialités au niveau industriel. Les universités et centres lasers pourraient participer activement à la mise en place et à l'exploitation de ces outils pédagogiques ;

- Encourager les industriels qui s'équipent de la technologie laser à suivre une formation au procédé en plus de la formation à la conduite de la machine dispensée par le constructeur (paragraphe 5.2).

Note : Le Club Laser et Procédés pourrait, si on lui en donne les moyens, participer à la mise en place des actions proposées ci-dessus, en concertations avec la Commission Nationale d'Optique et Photonique, les Universités, Ecoles d'Ingénieurs, Centres Laser et industriels concernés.

7.2.2 L'apport de l'optique dans la stéréolithographie et le prototypage rapide

La stéréolithographie est un procédé qui permet de réaliser directement un modèle d'une pièce, à partir de son fichier informatique, par photo polymérisation d'un matériau polymère (en général) au moyen d'un faisceau optique (en général U.V). Cette technologie a trouvé un de ses débouchés industriels les plus évidents dans le domaine du prototypage rapide. Toutefois les prototypes ainsi réalisés étaient, jusqu'à présent, en matériaux organiques et non dans la matière définitive.

7.2.2.1 La Position actuelle de la recherche en France

Seuls quelques laboratoires publics travaillent directement ou indirectement sur ce thème de recherche: à Nancy (laboratoires de l'ENSIC), à Limoges (CTTC associé au SPCTS), et à Marseille (laboratoires de l'Institut Fresnel). Par contre, il ne semble pas y avoir d'activité de recherche industrielle à proprement parler.

Les principaux travaux de recherche de ces dernières années ont été:

- Limoges développe des matériaux chargés en céramiques pouvant être associés à un procédé de stéréo lithographie, et étudie le procédé final de frittage permettant d'obtenir des objets en céramique pure.
- Nancy développe des procédés appliqués au génie chimique et aux applications médicales (prothèses). Ces travaux portent sur des études de matériaux, mais également sur les procédés associés aux micro et nano technologies par stéréo lithographie. Ce dernier axe de recherche fait fortement appel aux techniques optiques (photo polymérisation par ondes évanescentes pour les applications nano, conversion haute d'images visibles en UV par optique non linéaire pour la mise au point d'un procédé de micro stéréo lithographie dynamique UV). Dans ce thème de recherche, les apports de l'optique sont importants.
- Marseille démarre le développement d'un procédé de micro stéréo lithographie en collaboration avec Limoges, (procédé devant être compatible des matériaux développés). L'orientation de ces travaux de recherche concerne la micro stéréo lithographie UV pour des applications en biophotonique.

7.2.2.2 Les axes de recherche pour les prochaines années

Les deux axes les plus innovants au niveau scientifique sont:

- La stéréo lithographie d'objets fonctionnels en prototypage rapide. Axe orienté matériaux mais aussi process car on travaille sur des matériaux pâteux composés de poudres (métalliques et céramiques) et de liants organiques. Les applications privilégiées concernent la fabrication d'implants et de prothèses médicales.
- La micro stéréo lithographie. Avec l'objectif de réaliser des pièces 3D, ce que ne permettent pas les techniques planaires issues de la microélectronique. La rupture technologique à obtenir porte au niveau de l'étape d'éclairement (au moyen, en particulier, de masques dynamiques). Les axes d'applications privilégiés pour les années à venir porteront surtout sur la santé et les biotechnologies. Pour réussir, cet axe de recherche nécessite la mise en œuvre de différentes disciplines de l'optique: propriétés optiques des matériaux, interaction lumière matière, imagerie, focalisation des faisceaux laser, ajustement des sources optiques aux matériaux et applications, ...).

Enfin il y a un axe de recherche qui n'est pas abordé actuellement (aussi bien en France qu'à l'étranger) mais qui est fondamental pour arriver à franchir les sauts technologiques majeurs. Il s'agit de la modélisation des interactions lumière matière qui interviennent lorsqu'un faisceau laser focalisé balaye la surface d'un matériau composé d'une résine photosensible fortement chargée en poudre d'un matériau solide, de granulométrie typiquement comprise entre la longueur d'onde et 10 fois la longueur d'onde est un problème complexe et loin d'être résolu actuellement.

7.2.2.3 La position de la France, ses forces et faiblesses

Au niveau mondial, et ceci depuis quelques années, il existe de plus en plus d'universités ou de centres de recherche, aux USA, au Japon ou en Europe qui s'intéressent à la stéréo lithographie au sens large.

Comparativement les laboratoires de recherche français sont bien positionnés sur les matériaux chargés (Limoges) et sur la micro stéréo lithographie (Nancy et maintenant Marseille) ainsi que sur l'utilisation des techniques de masquage dynamique.

Il semble toutefois, et sans vouloir être négatif, que la France est en perte de vitesse, sauf au niveau des matériaux céramiques. Les japonais sont les rois de la résolution extrême, les suisses et les allemands sont très forts en procédés et ont bénéficié d'aides des industriels fournisseurs de résines.

Notre atout, en France, repose sur le savoir faire en matériaux chargés pour la stéréo lithographie, qu'il faudrait continuer à développer en cherchant de nouveaux domaines d'applications sur lesquels les industriels ne se sont pas encore positionnés, comme la micro fluidique par exemple, ou la réalisation de (micro)composants 3D actifs.

Au niveau industriel, il n'existe pas d'entreprise française de production de machines de prototypage rapide (marché dominé par les USA et le Japon). Seules quelques très grosses entreprises (constructeurs automobiles typiquement) disposent de leurs propres moyens de réalisation. Les entreprises françaises qui travaillent dans ce secteur sont surtout des entreprises de service, travaillant à la demande pour les entreprises de nombreux secteurs d'activité.

Enfin on trouve des machines industrielles de stéréo lithographie dans différents centres de transfert de technologie, d'enseignement ou de recherche, pour des activités qui ne concernent pas le développement du procédé en tant que tel, mais qui tournent autour du prototypage rapide.

Le marché mondial en 2000 était estimé à 1Md€ pour le prototypage rapide, avec un parc mondial de 6755 machines (en augmentation de plus de 1000 machines par an). Le parc européen installé en fin 2000 est d'environ 1700 machines, générant un CA estimé de 150 M€.

Le marché de la micro stéréo lithographie est dans une phase de mise en place. Aucune machine de micro prototypage rapide n'est actuellement disponible sur le marché, et donc aucune société de services en prototypage rapide n'est encore en mesure de proposer la réalisation de pièces à l'échelle "micro" à l'exception d'une société suisse, pour des produits polymères, avec une résolution de 5 à 10 μm .

7.2.2.4 Recommandations

- *L'axe de R&D qui semble être prioritaire et qui repose sur des atouts solides développés au sein des laboratoires français est la "micro fabrication 3D". Les technologies optiques y ont un rôle très important à jouer. Cet axe doit faire partie intégrante des axes stratégiques du Ministère de la Recherche et en particulier du programme interdisciplinaire de recherche "micro fluidique" du CNRS.*

- *Un autre aspect crucial, sur lequel des efforts importants de R&D devraient être consacrés si l'on veut réaliser de réels sauts technologiques, concerne la modélisation des interactions lumière matière dans le cas de formulation fortement chargées en poudre, avec comme souci permanent la volonté de contrôler la diffusion de la lumière sur les particules. Des modèles adaptés aux dernières évolutions technologiques des procédés restent à créer pour progresser efficacement au niveau de la résolution en stéréo lithographie et a fortiori en micro stéréo lithographie des matériaux chargés.*

Chapitre 8

COMPOSANTS ET SYSTEMES

8.1 -Positionnement du Thème

Le thème ‘composants et systèmes’ est très général et se trouve par définition dans une position entièrement transversale vis à vis des autres thèmes pris en compte dans la rédaction du livre blanc.

De plus le terme ‘système’ est redondant avec certains des sujets traités dans les autres thèmes qui traitent aussi des aspects systèmes de manière directement liés aux marchés considérés (visualisation, défense, instrumentation médicale, systèmes de télécommunications....).

Pour éviter cette redondance et mieux aborder une des problématiques particulières de l’optique, le groupe a décidé de remplacer le terme ‘systèmes’ par ‘sous-systèmes’ ou ‘modules optiques’ qui sous-entend un assemblage de composants optoélectroniques plutôt qu’un véritable système opérationnel. Le terme ‘système’ est ainsi réservé dans notre esprit à une association de ‘sous-systèmes’ de fonctionnalités complémentaires

Cette notion de ‘sous-systèmes’ ou de modules permet entre autre de mieux prendre en compte un problème crucial de l’optique : l’assemblage et le ‘packaging’, qui se pose de manière particulièrement aiguë à ce niveau.

8.2 Etat de l’art et évolution du domaine

8.2.1 1970-2000 : une révolution continue et sans précédent

Le début des années 70 a été marqué par des événements scientifiques qui ont bouleversé le domaine de l’optique :

- ç première diode laser semi-conducteur fonctionnant à température ambiante,
- ç premières fibres optiques à faibles pertes de propagation
- ç naissance de l’optique intégrée...

Les progrès technologiques continus effectués depuis 30 ans dans la fabrication des hétérostructures à base de semiconducteurs III-V et II-V ont révolutionné les liens entre optique et électronique. Ils permettent aujourd’hui de disposer de sources et de détecteurs présentant des performances optoélectroniques exceptionnelles sur des spectres de longueurs d’ondes de plus en plus en plus variées allant des rayons gamma aux longueurs d’ondes millimétriques en passant par l’ultra-violet et l’infrarouge.

La compréhension de plus en plus fine des phénomènes physiques mis en jeu a permis de contourner des obstacles qui, il y a quelques années encore, apparaissaient comme des véritables verrous. Associée à cette maîtrise technologique, elle permet de réaliser de nouvelles structures de dimensions nanométriques qui ouvrent des horizons extrêmement variés. Dans le domaine des diodes laser bleues par exemple les lasers à base de boîtes quantiques InGaN sont en train de modifier profondément le paysage de l'optique en particulier dans des domaines grands publics comme le stockage de l'information, les écrans plats et à terme l'éclairage.

L'amplification dans les fibres optiques dopées erbium a bouleversé le paysage des télécommunications optiques et aujourd'hui, la majorité des informations transmises sur la planète sont en effet à un moment donné de leur parcours véhiculées par des photons. Peu à peu, la fibre se rapproche de l'abonné et s'impose comme le support ultime capable de répondre à la demande toujours croissante de débit d'information.

L'optique intégrée s'est en moins de trente ans imposée comme une branche à part entière de l'optique. Elle a permis de surmonter des difficultés traditionnelles liées à la diffraction dans le domaine des composants actifs. Les modulateurs de lumière hyperfréquence et les composants d'optique non linéaire offrent aujourd'hui des performances qui ont considérablement modifié l'approche système dans de nombreux domaines des télécommunications, des capteurs ou de l'instrumentation.

Pour les composants passifs, la compacité offerte par l'intégration a permis la mise en jeu d'architectures plus robustes et de mise en œuvre plus facile qui commencent à s'imposer dans des secteurs applicatifs parfois très traditionnels de l'optique. Ainsi en astrophysique, l'utilisation de circuits intégrés interférométriques permet de mettre très simplement en pratique la mise en phase de grands télescopes et d'acquérir des images de résolution exceptionnelle.

Il est d'ailleurs intéressant de noter que tous ces apports fondamentaux de l'optique guidée, n'ont pas conduit, bien au contraire, à un déclin de l'optique espace libre.

La micro-optique a continué à progresser pour apporter sans cesse des solutions innovantes à la miniaturisation des systèmes optiques grâce au développement des techniques de moulage et de réplique. Les optiques asphériques plastiques fabriquées en grande série pour l'industrie du DVD et du compact disque présentent aujourd'hui des performances exceptionnelles et modifient énormément l'approche traditionnelle des systèmes optiques en particulier pour toutes les applications grand public.

Plus généralement, la maîtrise de nouvelles techniques de polissage et d'usinage, l'informatisation des outils de réalisation des pièces optiques et les progrès dans le domaine des matériaux et des couches minces ont considérablement modifié le paysage de l'optique traditionnelle aussi bien pour aller vers des objets de petites ou de grandes dimensions.

La réalisation de télescopes de plus de 10 mètres de diamètre n'étonne plus aujourd'hui les astronomes alors que pendant très longtemps les 6 mètres du télescope du mont Palomar ont constitué un exploit technique qu'il semblait presque impossible à surpasser.

Dans le même temps, les énormes progrès technologiques engendrés par la microélectronique et les technologies du silicium ont conduit à la naissance des microsystèmes qui commencent à modifier considérablement les potentiels d'intégration de l'optique aussi bien en régime espace libre qu'en structure guidée.

Les micro-miroirs mobiles sont en train de s'imposer en projection d'image avec les DMD (Digital Mirror Displays) et pénètrent peu à peu le domaine du routage tout optique. Des approches technologiques voisines permettent de réaliser des composants d'optique adaptative qui vont à court terme révolutionner des secteurs de marchés très variés en ouvrant de nouvelles possibilités de miniaturisation des composants optiques mobiles et en donnant de l'intelligence aux systèmes optiques.

Que seraient par exemple les biopuces sans la lecture optique par fluorescence?

Tous ces profonds changements qui ont véritablement commencé à se concrétiser au début des années 70 sont d'ailleurs sur le point de s'accélérer par l'arrivée d'un tournant technique très important en microélectronique.

En effet, depuis début 2000 la taille des motifs de l'industrie microélectronique est passé sous la barrière des 150nm et pour les démonstrateurs les plus avancés au dessous des 100nm. Cela signifie pour l'optique la possibilité de réaliser avec des outils industriels et sur de grandes dimensions, les microstructures indispensables à la réalisation de certains composants optoélectroniques clé: réseaux de Bragg, composants à bande photonique interdite, dispositifs d'optique diffractive de très haute performance....

L'optique et l'optoélectronique a donc été depuis plus de trente ans le théâtre de percées scientifiques et technologiques majeures dans le domaines des composants. Ces progrès devraient encore s'accroître dans les prochaines années compte tenu des évolutions en cours dans des disciplines connexes.

Malheureusement, la bulle technologique dans laquelle les télécommunications optiques ont joué un rôle majeur, et son effondrement ont profondément modifié le paysage industriel en particulier français dans le domaine et le constat optimiste qu'il serait tentant de faire est bien loin de la réalité.

Il est bien sûr crucial d'analyser tous ces événements au delà du contexte particulier né de la crise des télécommunications optiques et du pessimisme outrancier qui suit maintenant l'euphorie générale des années 98-2000.

8.2.2 Des difficultés et des blocages encore non surmontés

Les énormes progrès soulignés plus haut doivent permettre de modifier l'image traditionnelle un peu élitiste et réservée aux laboratoires de l'optique, et de lui ouvrir les portes des marchés grand public.

Il suffit de voir le succès des téléphones mobiles équipés de mini caméra pour se persuader que l'optique est en train de quitter ses vieux habits.

Les opticiens doivent cependant ne pas oublier que cette évolution implique aussi une dépendance de plus en plus forte de leur discipline vis à vis des autres domaines techniques, microélectronique, micromécanique, informatique....

L'optique est une science diffusante et son évolution actuelle, qui l'ouvre vers des domaines où la compétitivité économique devient cruciale, l'oblige à sortir de ces vieilles habitudes et dans une certaine mesure de ses blocages. Un des points fondamentaux à ce niveau reste celui de l'assemblage et du 'packaging' particulièrement important dans un contexte d'évolution où la miniaturisation et la diminution de poids prennent de plus en plus d'importance.

L'optique est plus que toute autre discipline scientifique et technique touchée par cette problématique du fait de son **hétérogénéité**. Contrairement à la microélectronique qui s'appuie sur un seul matériau, le silicium, un seul composant clé, le transistor, et une seule

technologie, la technologie MOS, et dont l'évolution spectaculaire au cours des trente dernières années repose presque uniquement sur une diminution constante des tailles de motifs mises en jeu, l'optique doit prendre en compte des technologies multiples, des matériaux et des fonctionnalités très divers.

De plus, si l'optique présente des avantages énormes par rapport à toutes les autres techniques pour véhiculer et traiter des signaux de haute fréquence, elle souffre néanmoins de plus grandes difficultés que l'électronique à miniaturiser certains composants de part les lois de la physique et de l'imagerie mises en jeu. **Cette hétérogénéité technologique et fonctionnelle pèse bien sûr considérablement sur l'assemblage des composants optoélectroniques et sur leur 'packaging'.**

Cet aspect a longtemps été négligé par la communauté de l'optique qui est restée très traditionnelle dans ses approches et qui a souvent privilégié des recherches plus valorisantes que celles, un peu ingrates, qui touchent au 'packaging'.

Cette faible considération pour un problème pourtant économiquement crucial a sans doute retardé l'entrée de l'optique dans de nombreux domaines grand public et explique, en partie, dans le secteur moteur des télécommunications, la lenteur de la pénétration de la fibre et des solutions optiques chez l'abonné.

Les technologies développées actuellement pour la microélectronique comme les technologies d'hybridation par matériaux fusibles offrent de ce point de vue un potentiel énorme pour l'optoélectronique et pour la réalisation de sous-systèmes mariant les nombreuses technologies optiques mises en jeu aussi bien en espace libre qu'en structures guidées.

Le problème n'est cependant pas simple à surmonter car, à la diversité des structures et des matériaux qui vient d'être soulignée, s'ajoute des contraintes d'alignement et de positionnement infiniment plus sévères que celles de la microélectronique.

L'adaptation de ces technologies à la problématique des 'sous-systèmes' optoélectroniques est donc sans aucun doute un des grands enjeux des prochaines années.

8.3 La position française

8.3.1 Le constat

La R&D et une partie de l'industrie de l'optique ont été au cours des trente dernières années, en France et dans la plupart des grands pays industrialisés, extrêmement poussées par les activités de défense (à l'exception de l'Allemagne et du Japon) et des télécommunications qui ont été les principaux moteurs des grandes révolutions évoquées.

En France, cette situation a considérablement évolué dans les dix dernières années pour deux raisons différentes :

- ç L'évolution et l'impact des soutiens dans le domaine de la défense
- ç L'effondrement de la bulle technologique et du marché des télécommunications optiques

L'évolution et l'impact des soutiens défense

La défense a pendant de longues années été un des principaux débouchés de l'optique dans notre pays. La DGA (Direction Générale de l'Armement) a largement soutenu à la fois des laboratoires publics comme le CEA ou l'ONERA et les grands industriels du domaine

comme les groupes Thalès et Sagem. Elle a contribué à entretenir sur le sol français un très bon niveau de R&D en technologie et en composants optroniques.

La réduction des financements attribués au secteur défense à partir du début des années 90, ainsi que de profondes modifications dans l'attribution des aides a profondément affecté le monde des industriels de l'optique qui, trop souvent, vivait sur ces marchés captifs et relativement protégés.

Cette fausse sécurité a conduit à un certain individualisme des acteurs, et à une absence de regard stratégique vis-à-vis de l'évolution du monde de l'optique.

L'industrie française de l'optique se trouve ainsi souvent en marge de marchés qui étaient pourtant sur le plan technique à sa portée et, ne s'étant pas modernisée en affrontant la concurrence, elle n'a plus la capacité organisationnelle de les attaquer.

Le tissu industriel français de l'optique présente ainsi le paradoxe d'être au meilleur niveau mondial sans pour autant être compétitif, faute d'avoir été confronté à la concurrence internationale.

L'effondrement de la bulle technologique et du marché des télécommunications optiques

Jusqu'à la fin des années 90, début de la vague de privatisations et de l'arrivée des dérégulations, le marché des télécommunications optiques était sans aucun doute le marché non pas le plus important en terme de volume, mais potentiellement le plus lucratif (parce que dans une certaine mesure protégé aussi...). Il a stimulé la R&D en particulier sur les composants pendant plus de trente ans.

Les profonds changements apportés par l'arrivée de la téléphonie mobile et d'Internet, l'ouverture du marché à de nouveaux opérateurs, la bulle technologique des années 98-2000 et son éclatement ont bouleversé le paysage mondial de l'optoélectronique.

Tous les grands centres de R&D ont subi d'importantes mutations, certains sont en forte décroissance ou sont en train de disparaître, d'autres ont vu leur activités composants réorientés vers des activités d'architectures de réseaux et de services.

Le paysage industriel a subi des modifications profondes et des acteurs qui, il y a quelques années encore jouaient les premiers rôles comme Lucent, Nortel, Corning ou Alcatel sont en proie à d'énormes difficultés et se désengagent des activités composants.

Les 'start-up' apparues en nombre au moment de l'euphorie des années 98-2000 ont, à quelques exceptions près disparu et pour celles qui résistent, la situation est difficile et l'avenir loin d'être assuré.

Dans le secteur des télécommunications, la bulle technologique a mis l'optique en haut de l'affiche, son effondrement la met aujourd'hui dans une position extrêmement délicate avec une crise de confiance de la plupart des acteurs industriels et financiers sans doute imméritée mais bien réelle.

En France, la situation est particulièrement inquiétante: France Telecom a arrêté à la fin des années 90 ses activités de recherche dans les composants optiques pour se recentrer sur les activités services; aujourd'hui Alcatel se désengage du secteur et l'avenir d'OPTO+ est incertain. Le centre de recherche en optoélectronique de Corning à Fontainebleau a arrêté ses activités. Alcatel Optronics est passé sous le contrôle américain d'Avanex. Highwave Optical, fleuron du nouveau marché en 2000, a vu ses effectifs divisés par 20 et son chiffre d'affaire par 50.

Nettest Photonetics qui avait une place de premier plan en micro-optique espace libre a maintenant quasiment disparu.

Pour les 'start-up' qui se sont lancées dans l'aventure et qui souvent s'appuyaient sur un savoir faire et des connaissances accumulées pendant des années dans les grands centres de recherche comme le CNET, ou le CEA/LETI la situation est souvent problématique. Celles dont le marché n'était pas exclusivement 'télécom' et qui sont restées de petite taille arrivent à subsister mais restent très fragiles d'autant plus que les investisseurs hésitent énormément à soutenir des entreprises dans le domaine de l'optique après les pertes énormes subies au cours des années 2002-2003.

Le flou qui pèse sur les financements d'Etat en 2004 et les retards ou les annulations de paiement de certains projets RNRT ou RMNT pénalisent les petites entreprises dont la trésorerie est souvent très limitée.

Les conséquences globales se résument à une énorme 'perte en ligne' pour l'ensemble des compétences accumulées et une disparition programmée de la France dans le domaine des composants optoélectroniques.

La gravité de la situation, si elle semble perçue par les industriels concernés, ne provoque malheureusement pas de réaction du fait de l'incapacité dans laquelle ils se trouvent à mobiliser les ressources financières nécessaires.

Un des arguments faussement utilisé est que le marché des composants n'est pas pour l'Europe mais pour l'Asie du sud-est. Cet argumentaire tient plus de la justification à posteriori, que d'une réelle analyse stratégique. En effet, si l'assemblage des composants à faible plus value technique peut être délocalisé vers les pays à coût de main d'œuvre réduit, la plupart des éléments à fort contenu technologique et stratégique reste fabriquée dans les pays occidentaux.

Il n'est que d'entendre les craintes des grands industriels français de la défense vis-à-vis de leur difficulté à s'approvisionner aux Etats-Unis en composants stratégiques pour s'en convaincre.

Par ailleurs, l'évolution de la microélectronique montre bien que l'apport du monde occidental reste largement prédominant en terme d'innovation technologique.

La vision actuelle des choses, souvent justifiée par des intérêts financiers court terme, peut donc s'avérer très vite catastrophique car les composants sont la clé de l'innovation et de toute réalisation système; la perte de nos compétences en technologie optoélectronique et en composants peut très vite affecter notre capacité d'innovation dans la réalisation des systèmes et donc dans toute la filière optique.

Les points de satisfaction

ç Quelques industriels restent bien positionnés dans la compétition internationale:

- Á Essilor occupe une place de leader mondial sur le marché des verres de lunettes, secteur de grande pérennité qui cherche à intégrer de nouvelles fonctionnalités pour se renouveler et qui peut trouver avec les micro-technologies des opportunités de R&D et de développement industriel pour lesquelles des atouts réels existe en France.

Á Dans le domaine de la détection infrarouge, la société Sofradir pour les détecteurs refroidis à base de HgCdTe et sa filiale Ulis pour les détecteurs non refroidis de type micro-bolomètres se positionnent d'excellente manière dans la compétition pourtant très sévère.

Cette maîtrise technique de la filière imagerie infrarouge résulte d'un soutien volontariste de la DGA et du CEA depuis la fin des années 70, et de l'étroite collaboration en R&D mise en place avec le LETI.

Elle maintient non seulement une excellente position de la France dans le domaine de l'infrarouge militaire, mais ouvre aussi la porte à nombreuses applications dans des domaines civils comme la sécurité et la protection de l'environnement (développement durable). La société Cedip utilise déjà ces nouvelles matrices refroidies et non refroidies.

Elle donne enfin accès à des savoir faire uniques dans divers branches techniques développées au départ pour la filière imagerie infrarouge (cristallogénèse des matériaux II-VI, techniques d'hybridation flip-chip, architecture des composants de détection....) qui permettent à l'industrie française d'être présente dans des secteurs divers et de jouer par exemple un rôle dans la détection du spectre de rayonnement électromagnétique allant des rayons gamma au millimétrique.

Á Quantel a su trouver une place dans le marché très concurrentiel des lasers.

Á Thales (Optronique, Angénieux, Laser Diodes) et Sagem sont toujours parmi les leaders dans leur domaine même si la part des composants dans leurs activités est en décroissance.

Á IXSea-Oceano, grâce à l'ensemble des compétences développées d'abord au LCR puis à Photonetics, a conquis une place de leader dans les marchés des gyromètres à fibres optiques.

ç Des opportunités de renouvellement technologique apparaissent dans le domaine des composants et du packaging:

La bonne position de la France en microélectronique silicium permet de disposer d'un potentiel technologique de premier plan. Celui-ci peut être adapté à l'optoélectronique pour apporter des solutions extrêmement innovantes et pour surmonter le handicap de l'hétérogénéité des technologies et des composants.

C'est en particulier le cas avec les techniques d'hybridation, matures en microélectronique et en imagerie infrarouge, qui paraissent en mesure d'apporter la robustesse et les précisions d'alignement requises pour l'optique, tout en respectant les exigences de coût demandées par certaines applications grand public.

C'est aussi celui des techniques de report, pour lesquelles nous possédons avec Soitec un industriel leader. Elles peuvent permettre de marier élégamment les nombreuses technologies de l'optoélectronique et la mise au point de véritables ruptures technologiques.

Dans le pire des cas, si la France n'est plus capable de maintenir un vivier technologique de premier plan en optoélectronique, ces approches pourraient lui permettre de garder une position forte dans le domaine des modules et sous-systèmes

en utilisant des savoir-faire déjà en place et qu'il suffit d'adapter aux besoins particuliers de l'optique.

Enfin dans le même contexte, le développement des micro-systèmes est aussi une occasion de profiter des fortes compétences existantes dans les organismes publics (CEA/LETI, IEMN, IEF, LAAS, LEOM...) et du potentiel industriel de sociétés comme ST microélectronique ou Tronic's Microsystems pour redonner à l'optique une nouvelle jeunesse.

Plus généralement, le potentiel de miniaturisation et la puissance de calcul offerts par la microélectronique dans les toutes prochaines années, va modifier la donne dans de nombreux secteurs et tout particulièrement dans la technologie très diffusante qu'est l'optoélectronique.

Il faut absolument profiter de ces opportunités et mettre en place les synergies permettant à l'optique de jouer un rôle de premier plan dans ce nouveau contexte.

ç Le développement du phénomène 'start-up' est porteur d'avenir :

L'explosion technologique de la fin des années 90 a suscité de nombreux démarrages de 'start-up', aux Etats-Unis bien sûr mais aussi en France ce qui est un phénomène nouveau et qui peut être le début d'un changement de mentalité des chercheurs et des ingénieurs français généralement peu enclin à franchir le pas de la création d'entreprise.

Dans le domaine des technologies et des composants, ces jeunes pousses s'appuient le plus souvent sur des savoir faire issues d'organismes de recherches publics comme le CNET (Highwave Optical, Algety, Keopsys...), le CEA (Opsitech, Tronic's Microsystems, Nanolase, Intexys...) ou des laboratoires universitaires (Teem Photonics, Photline, Moduloptique, Varioptic, Memscap....). Elles ont pu s'appuyer sur un savoir faire scientifique et technique solide et, globalement, ont mieux supporté la crise que leurs homologues américaines.

Elles ont aussi pu profiter de la mise en place de structure d'accompagnement (pépinières, incubateurs, structures de capital risque ...) qui n'existaient pratiquement pas il y a encore 7 ou 8ans.

Elles sont bien sûr pour la plupart encore très fragiles et il serait sans doute utile qu'elles identifient leur complémentarité et resserrent leurs liens; mais il y a ici plusieurs points positifs qui méritent absolument d'être entretenus.

Dans le domaine des sous-systèmes ou de l'instrumentation, il y a également une éclosion de petites sociétés très dynamiques (ImagineOptic, Mauna Kea Technologies, Fogale....) qui apporte sang neuf et imagination.

Cela montre que la culture d'entreprise peut se développer en France et il ne faudrait pas que les déceptions engendrées par l'écèlement de la bulle technologique compromettent de manière irrémédiable cet état de fait.

Le niveau de recherche en optique reste de bonne qualité:

Ce constat est assez général même si dans le domaine des composants il risque de se dégrader très vite avec la disparition des grosses centrales technologiques déjà évoquée.

Il est donc vital de prendre des mesures rapides pour ne pas perdre ce potentiel acquis au cours de longues années mais qui risque très vite de se perdre ou de se maintenir bon gré mal gré mais dans un environnement technologique complètement dépassé.

8.3.2. Les principales faiblesses de l'optique française

La finalité de toute nouvelle orientation dans le domaine scientifique et technique, optique ou autre, est principalement la création d'emploi et la génération d'activité économique. Cette quête implique naturellement tous les acteurs du cercle vertueux (ou en tout cas qui devrait être vertueux) qui va de la recherche fondamentale à l'industrie en passant par la recherche technologique.

Comme il a été souligné plus haut, l'optique est une technologie diffusante qui a la chance de jouer un rôle clé dans de nombreux secteurs de marché, chance que les évolutions actuelles vers la miniaturisation renforcent en rendant plus facile des associations qui n'étaient pas envisageables il y a seulement encore 5 ans.

A l'inverse cette complémentarité se traduit par une dépendance très marquée vis-à-vis des grands courants et des grandes évolutions de disciplines comme la microélectronique, la micromécaniques ou les sciences du vivant.

L'optique doit donc s'ouvrir de plus en plus vers l'extérieur et rentrer dans une approche plus concurrentielle: il n'est pas certain, au vu du constat que nous avons pu faire, que la position française, aussi bien au niveau de la recherche que de l'industrie mais aussi au niveau de la formation, soit la mieux armée pour bien aborder ce défi.

- ç Les financements défense, qui ont permis durant de longues années de conserver un niveau de R&D de très bon niveau, n'ont pas eu dans de nombreux cas toutes les retombées industrielles qui pouvaient être espérées dans les domaines civils.

Ce schéma de financement privilégie en effet les performances techniques au détriment de la compétitivité économique. Ce constat est particulièrement marqué dans l'industrie optique française que l'on peut qualifier de conservatrice.

Le GIFO pourrait jouer un rôle pour modifier cette situation; il doit pour cela résolument accélérer son évolution vers plus de modernisme et une ouverture plus large tenant compte des orientations les plus récentes de l'optoélectronique. Il doit pour cela prendre complètement à son compte les bouleversements scientifiques et techniques qui ont, plus que pour tout autre discipline dans ces dernières années, profondément modifié le paysage de l'optique.

Il pourrait s'inspirer à ce niveau de l'OITDA (Optoelectronic Industry and Technology Development Association) Japonais qui affiche clairement au bénéfice de l'industrie optoélectronique, de promouvoir:

- Á le développement technologique,
- Á l'établissement de normes,
- Á la création d'entreprises,
- Á le renforcement des échanges internationaux

- ç La recherche universitaire, importante en optique reste beaucoup trop concentrée sur la performance pure et peu ouverte vers les véritables besoins de l'industrie. Elle a encore trop peu conscience qu'elle doit être une composante fondamentale du cercle vertueux qui a pour objectif d'alimenter le développement industriel et l'innovation.

De manière globale, le transfert des connaissances entre recherche et industrie est peu satisfaisant. Cette situation est le résultat de plusieurs états de fait :

- Á Les laboratoires universitaires privilégient les publications et entretiennent un état d'esprit recherche pour la recherche qui accentue l'incompréhension et le clivage entre recherche et industrie.

De ce fait, les brevets ne constituent pas une priorité forte pour les mêmes raisons et de bonnes idées sont souvent publiées avant d'être brevetées et font ainsi perdre à l'industriel potentiellement reprenneur d'une recherche un atout important par rapport à ces concurrents.

Il semble que cette situation soit en train d'évoluer en particulier dans les laboratoires CNRS et universitaires les plus en prise avec la demande industrielle mais les habitudes ne peuvent qu'évoluer lentement et sous l'effet d'incitations claires.

- Á La difficulté d'obtenir des postes d'ingénieurs et de techniciens dans les universités et au CNRS constitue un autre obstacle.

Elle conduit à un manque de véritables compétences pour assurer les transferts de technologie car ce type d'activité ne fait pas appel aux mêmes qualités et aux mêmes compétences que le travail de recherche fondamentale.

Il y a donc à la fois une pénurie d'ingénieurs et de techniciens et des règles d'avancement qui ne favorisent pas les catégories de personnel qui seraient les plus aptes à assurer ces transferts.

- Á Enfin le manque de moyens technologiques des laboratoires universitaires est une autre difficulté qui freine le transfert industriel. L'écart entre les moyens des laboratoires qui ont servi à la démonstration de faisabilité et les moyens nécessaires à la réalisation d'un véritable prototype industriel étant trop important, il devient impossible d'assurer la continuité nécessaire et le bouclage du cercle vertueux évoqué plus haut.

Ce point est d'autant plus critique dans le domaine des composants que les moyens et les investissements nécessaires à la conduite d'une recherche de qualité ont cru exponentiellement ces dernières années. Il y a donc ici un danger de marginalisation scientifique et technologique des laboratoires universitaires si des regroupements et des structures de **mutualisation** efficaces ne sont pas rapidement créés.

- ç **Le manque de lien entre recherche et industrie.**

Ce point est la conséquence de ce qui vient d'être dit et s'avère de plus en plus crucial en France.

Les grands laboratoires de développement industriels en optoélectronique sont en voie de disparition et les organismes chargés de la recherche sont à quelques exceptions près incapables de transférer efficacement leurs connaissances vers l'industrie. Ils n'ont d'ailleurs la plupart pas été créés dans ce but et ne disposent pas des ressources matérielles et humaines pour répondre à ce type d'objectifs.

Par ailleurs, le contexte économique actuel n'incite pas nos industriels à investir dans la recherche sur les composants et ne conduit pas à l'établissement d'un véritable dynamisme de l'innovation.

Il est donc indispensable de créer de véritables structures construites et pensées pour transformer en richesse industrielle les idées de nos laboratoires de recherche. Pour être efficaces, elles doivent réunir dans un contexte rapproché les trois composantes de l'innovation : recherche de base, recherche technologique et industrie.

Ces structures de liaison doivent être de véritables ponts entre recherche et industrie et rassembler le plus possible des équipes communes, un peu comme le sont en Allemagne les 'Fraunhofer' ou en Suisse le CSEM. Elles doivent à tout prix être organisées pour empêcher les clivages naturels entre les composantes du cercles vertueux de l'innovation et du développement scientifique et industriel ; il ne servirait à rien de créer des structures intermédiaires qui doubleraient seulement le nombre d'interfaces sans apporter les liens, le ciment et la cohésion nécessaire à la réussite.

Ces structures de développement et de transfert technologique ne peuvent donc réussir dans leur mission qu'avec l'adhésion sans réserve et la participation active de tous les acteurs. Cela suppose des changements de mentalité aussi bien de nos industriels que de nos chercheurs et une intervention concertée incitatrice de l'ensemble des organismes de tutelles qui doivent mettre en place les soutiens, les indicateurs de réussite et les moyens de contrôle nécessaires au bon fonctionnement de l'ensemble.

La tâche est sans doute particulièrement difficile en France du fait de la diversité de nos organismes de recherche, mais elle est vitale pour conserver une place parmi les premiers.

8.4. Les recommandations pour surmonter ces difficultés

Sur le plan particulier des composants et des sous-systèmes optiques :

1. *Etablir un **plan stratégique** à 10 ans tenant compte de l'énorme évolution des technologies optiques et en identifiant les orientations les plus critiques pour l'industrie française.*
2. *Coordonner les politiques de recherche et la politique industrielle (soutien aux industries innovantes etc...) pour réussir cette stratégie.*
3. *Mettre en place un réseau national de **plate-formes technologiques** de transfert vers l'industrie, qui aura un rôle de développement de technologies dont les concepts auront été étudiés au sein des organismes publics de recherche en collaboration avec la demande industrielle.*

Le modèle allemand des 'Fraunhofer Gessellschaft' paraît être un bon point de départ. Le CEA pourrait offrir le cadre légal nécessaire pour construire ce réseau.

4. *Mettre à profit les synergies avec la microélectronique, qui constitue aujourd'hui en France l'axe de développement technologique moteur, pour développer et mettre au points les ruptures techniques capables de bouleverser à moyen terme les approches traditionnelles de l'optique et de surmonter l'obstacle de l'hétérogénéité: **techniques d'hybridation, de scellement, de report de couches, de fabrication et d'assemblage collectifs des composants...***

*Il faut en particulier favoriser les recherches dans le domaine de l'**assemblage** et du '**packaging**' en adaptant certaines technologies déjà disponibles et matures de la*

microélectronique à la problématique particulière des composants et des sous-systèmes optoélectroniques.

Dans le pire des cas, si la France n'est plus capable de maintenir un vivier technologique de premier plan qui lui permette de garder une position forte dans le domaine des composants, il faut au moins qu'elle puisse jouer un rôle dans les modules et sous-systèmes par des approches de 'packaging' innovantes.

Sur un plan plus général :

- 5. Favoriser les **rapprochements multidisciplinaires** (microélectronique, micro-systèmes, biologie, fluidique...) pour dynamiser l'innovation en optique, lui faire profiter des synergies technologiques disponibles, lui donner accès aux véritables enjeux industriels des différents secteurs concernés et lui ouvrir de nouveaux marchés.*
- 6. Adapter les règles de fonctionnement des laboratoires universitaires et CNRS pour favoriser les comportements d'ouverture et l'intégration rapide et efficace des recherches amont vers le réseau des plate-formes technologiques préconisé en recommandation n°3.*
- 7. Adapter les profils des diplômes en optique et optoélectronique à cette évolution en créant des formations plus proches des besoins de l'industrie et des progrès technologiques plus centrés sur l'ingénierie (en particulier à l'IOTA).*
- 8. Poursuivre les efforts entrepris depuis une petite dizaine d'années pour créer des structures d'accompagnement et de soutien à la création d'entreprises (pépinières, incubateurs, structures de financement et de conseils....*
- 9. Créer les conditions pour que les financements et les soutiens apporté par la défense, qui sont une des principales sources de financement de l'innovation technologique en France, puissent avoir des retombées aussi dans les domaines d'applications civiles et profitent ainsi à l'ensemble de l'industrie française.*

Il faut pour cela s'appuyer sur des analyses et une stratégie long terme qui rejoignent la recommandation n°1 sur l'établissement d'un plan stratégique à 10 ans sur l'optique.
- 10. Favoriser l'avènement d'un syndicat unique de l'optique capable de fédérer les recherches, d'orienter et de stimuler l'ensemble de la communauté de l'optique autour de projets ambitieux alliant recherche et industrie.*

**Liste non exhaustive d'entreprises impliquées
dans les
composants et sous-systèmes optiques:**

ç Composants optiques, passifs (dont fibres, connecteurs...)

Alcatel Fibre	Fibres Optiques et composants fibrés
Acome	Fibres optiques plastiques
ATI optique	Coupleurs et filtres
Cristal Laser	Cristaux électro-optiques
Deutsch	Duplexeurs et connecteurs
Essilor	Matériaux et verres lunetterie
Highwave Optical	Fibres optiques et filtres de Bragg
Hologram Industries	Hologrammes
Idil Fibres Optiques	Composants et connecteurs
Fichou	Composants optiques
Gaggione	Composants d'optique plastiques
Jobin-Yvon	Réseaux de diffraction
Kylia	Composants passifs
Nachet	Objectifs
OPA Opticad	Composants optiques
Optique J. Fichou	Composants optiques
Optimask	Masques pour la lithographie
Radiall	Connecteurs
RSA Le Rubis	Cristaux Rubis
Saint Gobain Cristaux et Détecteurs	Cristaux pour l'optique (scintillateurs, lasers...)
SEDI Fibres Optiques	Fibres optiques et connecteurs
Silios Technologies	Composants passifs
TDO Fibre Optique	
Teem Photonics	Diviseurs intégrés
Thalès Angénieux / High Tech Optics	Composants optiques
Thalès Identification	Hologrammes
Thomas	Composants optiques plastiques
Verre fluoré	Verres pour l'infrarouge
Xenocs	Composants optiques X-UV

ç Couches minces pour composants optiques

Sagem (activités Reosc, Sfim,...)	
Thalès Angénieux / High Tech Optics	
Schott-Guinchard (Suisse)	
Essilor	
Cilas	
Tofico	
Xenocs	Traitements et composants X-UV

ç Composants optoélectroniques actifs (hors sources laser)

AA	Composants acousto-optiques
Avanex (ex-Alcatel Optronics)	Amplificateurs
Atmel	Barrettes CCD
Cedip-IR	Imagerie IR
DA-LightCom	Composants et sous-systèmes
D-Lightsys	'télécom
Inanov	Afficheurs
Highwave Optical	Amplificateurs télécoms
Memscap	Mems optiques
Module optique	Composants électro-optiques
Nemoptic	Afficheurs LCD
Photline	Modulateurs électro-optiques
Optogone	Composants 'télécom'
Opsitech	Composants 'télécoms' SiO ₂ /Silicium
Sofradir	Matrices détecteurs IR
Soitec / Picogiga	composants SOI, III-V
Teem Photonics	Amplificateurs intégrés
Temex	
Tronics Microsystems	Mems optiques
Thales Avionics LCD	Afficheurs LCD
Ulis	Matrices détecteurs IR non refroidis
Varioptic	Lentilles à focale variable

ç Sources lasers

Amplitude-Technologies	Lasers femto
Amplitude-Systèmes	Lasers femto industriels
Avanex (ex-Alcatel Optronics)	Diodes laser télécoms,
Cascade Technologies	Amplificateurs
Cheval frères	Lasers à cascade quantique
Cilas	Laser de marquage
JDSU Nanolase	Laser et Instrumentation
Keopsys	Microlasers
Nettest Photonics	Laser à fibre
NovaLase	Lasers accordables
Quantel	Lasers femto
Sopra	Laser à solide
Thales Laser Diodes	Lasers et instrumentation
Thales laser	Diodes lasers de puissance
	Laser solide et femto

ç Modules et sous-ensembles d'instrumentation

Aevix	
Beamind	Instrumentation pour tests

Bertin	Instrumentation
Bioret	Biophotonique
Data Pixel	Systèmes de mesure optiques
Ekinops	
Fastlite	Instrumentation femto
GenOptics	Biophotonique
Genewave	Biophotonique
HGH	Imagerie IR
Idil Fibres Optiques	
Ifotec	Modules optoélectroniques
Imagine Optic	Mesure et correction de front d'onde
Imagine Eyes	Mesure et correction de front d'onde (ophtalmo)
Inopsis	Équipement pour la biologie
Intexys	Modules d'émission-réception datacoms
IXSea-Oceano	Gyroscopes à fibre optique
Jobin-Yvon	Instrumentation
Lauer Microscopie	Microscopie
Laselec	Marquage de câbles
Micro Module	Instrumentation
Mauna Kea Technologies	Biophotonique
Locan Photonics	Telecom, WDM
Nettest Photonics	Telecom, WDM
OPUS	Machines de positionnement
Osyris	
Phasics	Mesure et correction de front d'onde
Photscan	Instrumentation femto
Sageis-CSO	Instrumentation et ingénierie optique
Sagem	Sous-systèmes optroniques
Sodern	Imagerie et instrumentation spatiale
Sopra	Instrumentation, ellipsométrie
SESO	Instrumentation
Sagem	Instrumentation optronique
SESO	Systèmes laser
Thales Optronique	Sous-systèmes optroniques
Tietronics	Protections contre l'éblouissement
Trixell	Détecteurs radiologiques
Yenista Optics	Modules télécoms

Chapitre 9

INSTRUMENTATION DE CONTROLE ET DE MESURE

Dans ce dernier thème ont été rassemblées les différentes méthodes de contrôle et de mesure optiques. Ces techniques sont extrêmement variées et plutôt que de rechercher l'exhaustivité, nous avons identifié plusieurs sujets importants traités de façon autonome en annexes et ce chapitre « chapeau » résume les grands points communs du domaine sachant aussi que le sujet a déjà été abordé dans les chapitres précédents orientés sur les domaines d'applications : Télécommunications, Santé et Sciences de la vie ou Défense et Sécurité.

Ces différents sujets traités en annexes (voir fascicule II) sont :

- Contrôles et mesures interférométriques et holographiques
- Interférométrie speckle
- Holographie numérique
- Métrologie optique dédiée aux écoulements
- Vision de deuxième génération
- Microscopie en champ proche
- Capteurs à fibre optique
- Télémétrie laser

Ici encore se retrouvent la force et la faiblesse de l'optique en France : une très bonne recherche, bien positionnée au plan international et souvent pionnière, mais une difficulté réelle de transfert industriel bien que la situation s'améliore. Ce problème de transfert serait même exacerbé car contrairement aux télécoms avec Alcatel ou à la défense avec Thalès ou Sagem, il n'y a pas en France de grands industriels en instrumentation de mesure. Ces derniers sont japonais et américains, ou allemands en Europe.

Néanmoins, ce frein au transfert pourrait ne pas être rédhibitoire. En effet les techniques optiques de mesure et de contrôle se caractérisent souvent par la spécificité de leur domaine d'application et se prêtent donc bien au passage industriel via la création d'une PMI spécialisée plutôt que par transfert dans un grand groupe. L'expérience des télécoms optiques montrent que la création de PMI de haute technologie et leur croissance devient possible en

France même si l'implosion de la bulle peut laisser un goût amer ou en tout cas inciter à une grande prudence.

Cette spécificité du domaine d'application amène un autre commentaire. L'introduction d'une nouvelle technique optique présente toujours un caractère « missionnaire » où il faut convaincre des utilisateurs potentiels qui ne sont pas familiers avec la technologie et donc naturellement réticents. En effet si, comme il a déjà été dit, la formation de spécialistes opticiens est bonne en France, l'optique reste peu connue ou oubliée dans les autres formations scientifiques et techniques. Sans prétendre à l'« universalité » de la mécanique, de l'électronique ou de l'informatique, l'optique ne peut plus cependant être considérée seulement comme une science de spécialistes au vu des très nombreux domaines techniques où son apport est clef.

Ce groupe d'experts Instrumentation confirme donc deux recommandations principales :

- favoriser la création de PMI spécialisées à partir des technologies mises au point dans les laboratoires publics

- pousser un enseignement de base en optique dans les différentes formations techniques et scientifiques au vu de son caractère de technologie diffusante

Enfin, même si le sujet est délicat, il faut que tous soient conscients que l'efficacité des financements passés de la DGA et de France Télécom manque aujourd'hui dramatiquement en particulier pour les PMI . Les appels d'offre nationaux ou européens actuels auxquels il faut répondre en consortium ne sont pas adaptés à l'échelle de temps ni de complexité de ces petites structures.

Chapitre 10

SYNTHESE ET RECOMMANDATIONS

Dans chaque chapitre du rapport, des recommandations et suggestions (elles apparaissent souvent en italiques) ont été proposées suite aux travaux des experts. Ce chapitre 10 n'a pas pour but de toutes les reprendre mais de faire apparaître les recommandations communes et générales.

Lorsque nous avons interrogé nos collègues opticiens, une grande partie nous a fait part d'un certain désarroi et de sentiments contradictoires :

- d'une part une inquiétude pour l'avenir, suite aux transformations industrielles (réduction des personnels, disparition de certains secteurs d'activité en France et parfois en Europe) et peut être aussi le sentiment que l'optique n'est pas reconnue en France (en qualité d'une branche spécifique de la physique) comme dans les autres pays industrialisés. Les craintes portent aussi sur l'emploi des étudiants formés et sur l'avenir de la recherche.

- d'autre part la certitude des immenses possibilités offertes à l'avenir par l'optique malgré la crise actuelle compte tenu des bases existantes en formation et en recherche publique ou industrielle et de la dynamique entretenue par la communauté des opticiens.

10.1 Reconnaître l'optique

Un des problèmes importants est la non prise en considération de l'optique en tant que telle. Elle est toujours intégrée dans l'électronique ou à la mécanique et n'apparaît pas clairement alors qu'elle représente une entité forte et une communauté structurée. Ceci est notable en particulier si on recherche un enseignement ou un cursus d'enseignement en formation continue ou initiale, ou un emploi. Ceci est probablement dû au fait que c'est une technologie diffusante et que son essor est récent. C'est un état de fait auquel il convient de remédier. La communauté a donc du mal à se faire entendre. Le Comité National d'Optique et de Photonique, nouvellement créé, devra jouer un rôle décisif pour affirmer cette identité.

Plusieurs suggestions peuvent être faites afin de faire émerger le concept de « label optique » :

- 1) - Reconnaissance des métiers liés à l'optique. Il est important que l'optique soit identifiée à ce niveau.

- 2) - Etablissement d'un plan de développement industriel et de recherche sur quelques années avec une ligne budgétaire propre. Il sera justifié en fin de chapitre.

3) -Mise en place d'un réseau d'écoles d'ingénieurs spécifiques regroupant les quelques écoles qui ont une filière identifiée en optique avec pour tête de file l'Ecole Supérieure d'Optique (ESO).

4) – Renforcement du syndicat industriel afin d'avoir une structure représentative unique et forte.

10.2 Conforter les formations

Les forces.

On observe pour l'enseignement de l'optique dans l'enseignement supérieur :

- . une bonne répartition géographique des formations,
- . un nombre suffisant de centres de formation,
- . un choix satisfaisant de cursus.

Cet ensemble permet de former les techniciens, les ingénieurs, les chercheurs et les enseignants dont les entreprises et les organismes ont besoin.

Ces observations ne masquent pas le fait que des améliorations notables peuvent être apportées localement.

Les faiblesses

Il y a peu d'enseignements d'optique dans l'enseignement secondaire. Il est nécessaire de maintenir un niveau suffisant d'enseignement de l'optique dans ce cursus et en particulier dans les filières technologiques, les opérateurs ayant de plus en plus à utiliser des moyens optiques pour mesurer et contrôler des processus industriels ou d'intégrer cet outil dans la conception de systèmes.

Une tendance à réduire l'enseignement de l'optique générale dans certaines filières où cette discipline est considérée comme secondaire est néfaste compte tenu du caractère diffusant de l'optique.

Les enseignements sur les aspects technologiques ne sont pas assez mis en valeurs dans les écoles d'ingénieurs (par exemple sur les procédés d'usinage ou de traitement des matériaux par voie laser ainsi que sur l'environnement industriel qui s'y rattache, ou encore sur les technologies de salles blanches de l'optoélectronique).

Par ailleurs, un réel problème existe au niveau de la formation des opérateurs devant acquérir une spécialité sur le façonnage (polissage) et également pour le montage d'éléments optiques (sous-ensembles optiques et équipements).

Recommandations

- Introduction de l'enseignement de l'optique dans des cursus où elle est absente comme les formations de mécanique et de chimie dans les Ecoles et dans les BTS classiques de vibrations acoustiques et d'analyse vibratoire ou de cursus d'électronique. En effet les moyens de contrôle et de mesure dans ces disciplines sont souvent optiques.

- Enseignement dans les filières de techniciens opticiens des bases de mécanique et d'électronique. En effet l'industrie actuelle a besoin de techniciens opticiens qui possèdent non seulement de fortes connaissances en optique mais qui soient plus généralistes.

- Création de nouvelles formations : formation de personnels techniques pour la réalisation de pièces optiques ou d'ensemble instrumentaux - d'une part pour la formation des opérateurs de polissage (le nombre d'élève à former est toutefois restreint voir proposition au chapitre 7) – d'autre part pour la formation des monteurs en créant un cycle court adapté ou en renforçant un cursus existant.

- Renforcement de certains enseignements : soit dans de nouveaux secteurs (bio photonique) soit dans des domaines peu enseignés : les technologies, la photochimie, la physico-chimie, le contrôle industriel, la télédétection, la colorimétrie et la représentation des couleurs ainsi que l'optique physiologique.

- Participation accrue dans ces enseignements de personnels venant de l'industrie sur des problèmes relevant de leur compétence.

10.3 Développer la recherche en optique

Les forces

Dans l'ensemble la recherche française en optique est de bon niveau avec des équipes reconnues internationalement dans les recherches fondamentales allant des atomes refroidis par voie laser à la réalisation de nouveaux matériaux, et dans certains créneaux technologiques où la position est parmi les leader mondiaux. Il est très important de maintenir ce niveau.

Dans la recherche publique on assiste à des regroupement de laboratoires et de centres afin de mutualiser les moyens et les outils lourds rendant par la même de telles structures incontournables au niveau européen. C'est une tendance à renforcer.

Une partie des laboratoires universitaires travaillent sur des sujets en liaison étroite avec le monde industriel.

On assiste à des travaux multidisciplinaires dans certains secteurs (par exemple dans les télécommunications, les sciences du vivant....), c'est une tendance à encourager.

Les faiblesses

Compte tenu de la crise un certain nombre de secteurs de recherche industrielle (et appliquée) sont en perte de vitesse car non relayés par les laboratoires publics.

La recherche technologique n'est pas toujours valorisée par rapport à ce qu'elle est au niveau de la recherche fondamentale.

Le manque de lien entre recherche et industrie. La recherche universitaire, qui est importante en optique, reste beaucoup trop concentrée sur la performance pure et peu ouverte aux véritables besoins de l'industrie ou du marché. Encore faut-il que les besoins soient clairement exprimés et les conditions d'utilisation bien définies afin d'appréhender les contraintes d'emploi.

On constate que malgré une activité dynamique, avec un très bon niveau de recherche comparé à celui qui caractérise le niveau international et parfois avec une bonne appréhension de la phase développement, ce potentiel manque de crédibilité pour alimenter et pour engendrer une production industrielle.

Les laboratoires manquent de moyens compte tenu des coûts élevés attachés à la mise en oeuvre d'une technologie élaborée et fine et à ceux liés à l'entretien des outils.

Recommandations

Les chercheurs ont besoin d'équipements performants. Compte tenu des coûts élevés des centrales de technologie il est nécessaire de renforcer celles existantes, d'éviter une dispersion des moyens et de veiller à ce que soit respectée une répartition équitable selon les thématiques. Il est nécessaire de ne pas multiplier ces centrales mais de bien les équiper, de leur affecter un personnel permanent qualifié et de gérer leur accessibilités aux laboratoires et aux entreprises concernés. Parmi les domaines où ces centrales sont une nécessité nous pouvons citer :

- les télécommunications optiques (liées à la réalisation des préformes et de fibres spéciales, à la réalisation de composants actifs semi-conducteur et à la réalisation de composants passifs)
- la visualisation
- l'élaboration de matériaux
- les lasers
- les procédés de fabrication

.....

Un certain nombre de secteurs de recherche sont à développer car ils représentent des enjeux pour l'avenir (voir chapitres 3 à 9):

- . les matériaux pour l'optique (y compris les matériaux sols-gels),
- . la visualisation,
- . les télécommunications,
- .- les recherches sur les applications de l'optique dans le domaine des sciences du vivant qui sont effectuées dans un certain nombre de petites équipes avec quelques succès . Il faut joindre à ce thème les recherches liées au handicap.
- . les domaines où il y a peu d'équipes: le transport d'énergie, le solaire...par rapport aux enjeux économiques.
- . les secteurs où il est nécessaire de maintenir un savoir faire compte tenu de la disparition de centres industriels en vue d'un rebond : les composants

Il faut aussi :

- . renforcer les collaborations multidisciplinaires et les partenariats*
- . coupler davantage la recherche publique avec le secteur industriel*
- . faciliter le développement de la recherche appliquée (voir §2.6).*

Il faut enfin ouvrir des possibilités d'initiation de thèmes de recherche par l'industrie. Le développement des applications de la recherche et des technologies pour passer du domaine du laboratoire aux produits industrialisés est le maillon faible. Il manque souvent les phases de pré-développement et de développement avec la diversification des métiers de l'optique et les investissements nécessaires qui deviennent de plus en plus lourds car cela n'est pas du ressort de la recherche universitaire. Ces phases ne sont parfois pas possibles pour des TPE (Très Petites Entreprises) si elles ne sont adossées à de grands groupes .

10.4 Faciliter les relations recherche-industrie et les transferts de technologie

Les forces.

Récemment un certain nombre d'initiatives ont vu le jour pour renforcer les collaborations entre équipes de recherche et industrie et pour aider au transfert de compétences - soit dans les régions (pôles) - soit par discipline (centres lasers, ...) - soit créés par les organismes ou le ministère. Il est important de les accompagner et d'aller plus loin dans le soutien aux activités de pré-développement.

Les faiblesses.

De manière générale la collaboration entre universitaires et demande industrielle n'est pas toujours simple à développer. Le chercheur doit tenir compte de ses propres programmes dans le cadre des contrats passés entre les organismes et le Ministère de tutelle. Même si ces derniers ont assoupli leur position et incitent ouvertement au transfert, l'avancement des chercheurs se fait encore essentiellement au niveau de certaines commissions uniquement sur les publications scientifiques et sur leurs propres thèmes de recherche. Or les besoins industriels ne coïncident pas toujours avec ces thèmes et avec les objectifs des chercheurs. Ceci conduit à affaiblir la reconnaissance d'une recherche appliquée qui présente un impact sur le développement de composants critiques au niveau des branches industrielles.

Il est souhaitable que la recherche appliquée soit mieux prise en compte dans certaines commissions d'avancement des personnels chercheurs.

Recommandations

La création d'équipes mixtes industrie et laboratoire public ainsi que d'équipes multidisciplinaires autour de l'optique sont des moyens privilégiés permettant d'acquérir et de développer l'esprit de collaboration tout en adressant les vrais problèmes.

Pour aider à la bonne marche des programmes de transfert (dans le cadre de création d'entreprise ou de nouveaux produits ou de fonctionnement d'équipements lourds communs) il serait bon de créer des postes d'ingénieurs de développement dont la vocation serait d'être une interface entre les outils technologiques qui alimentent la recherche de base et qui adressent également la conception de démonstrateurs. Ces personnels travailleraient avec le

créateur d'entreprise pendant une durée limitée pour l'aider dans la partie technique et sur la manipulation des équipements lourds pendant la phase de développement du programme.

10.5 Conforter l'industrie de l'optique

Les forces.

La France dispose d'un certain nombre de secteurs industriels forts impliquant de l'optique avec des entreprises leaders européens ou mondiaux dans leur domaine :

- l'optique ophtalmique et la lunetterie,
- l'optronique,
- les télécommunications optiques
- le spatial et l'avionique
- la visualisation,

Les faiblesses.

Dans certains secteurs le potentiel d'entreprises présentes n'est pas assez grand par rapport au marché et les grands leaders sont étrangers c'est le cas des lasers, de l'éclairage, des composants, des dépôts sols-gels et des écrans plats. Dans d'autres domaines on ne note la présence que d'une seule entreprise : disques optiques ou encore le photovoltaïque.

Dans certains secteurs la France est peu présente : les matériaux passifs, la photographie, le cinéma, la biophotonique, le contrôle et l'instrumentation.

L'industrie de l'optique a autrefois (jusqu'en 1990) été soutenue par la Défense, par des aides publiques ou par l'existence d'opérateurs étatiques (en télécommunications par exemple) ce qui lui a permis d'acquérir un savoir faire important. La diminution de ces financements liée à une réduction des budgets a mis une partie de cette industrie en difficulté.

Elle a du faire l'exercice du passage d'un marché captif (couvrant les besoins de la nation) à celui plus concurrentiel et compétitif ouvert sur le monde. Certains pans industriels n'ont pas survécus. En revanche, cette ouverture a permis à de grandes entreprises de se bâtir une réputation dans leurs secteurs. Cependant, l'actualité a montré qu'en situation de crise les industriels de l'optique, en particulier ceux liés aux télécommunications, sont devenus vulnérables et entraînent avec eux, dans leur stratégie de repli, la disparition de nombreuses PME et de PMI.

Il en va de même sur l'actualité du sujet qui présente un fort impact au niveau de la recherche académique, ce qui impose aux laboratoires de définir de nouvelles orientations ou au contraire une nouvelle stratégie.

Enfin, les délocalisations et les ventes d'une partie des unités de fabrication des composants vont créer à l'avenir un risque important de rupture d'approvisionnement. Cet aspect est particulièrement important en optronique qui conserve un caractère stratégique.

Recommandations.

Tous les experts s'accordent pour dire qu'il faut conserver une activité de production forte sur le territoire national pour maintenir les débouchés de nos étudiants, une recherche de haut niveau et une certaine indépendance (tout ceci doit être étendu au niveau européen).

Comme on l'a déjà signalé afin d'aider au développement des entreprises, il est nécessaire de renforcer les collaborations industrie recherche et d'accompagner les centres de technologie et/ou de transfert qui se mettent en place.

Certains secteurs doivent impérativement être soutenus car ce sont des secteurs clés ou des secteurs en développement. En particulier les industries :

- de l'optronique (défense)*
- des nouvelles techniques de visualisation*
- des composants et des couches minces (y compris en télécommunications) et l'instrumentation optique*
- de la biophotonique*
- des lasers et de leurs applications*
- des matériaux plastiques*

*Comme il est souhaité à plusieurs endroits dans les chapitres de ce **rapport un plan de développement** doit être mis sur pied sur plusieurs années. Les raisons sont les suivantes :*

On constate que malgré une recherche et parfois un développement important et de niveau international, les investissements et la production sont délocalisés en Asie. La recherche ne se sépare que rarement des lieux de production et il y a fort à craindre que la recherche dans un certain nombre de domaine ne se fasse plus en France. Dans le domaine de la microélectronique où les investissements nécessaires sont équivalents, un plan de développement a permis de maintenir en France une activité de production de circuits intégrés. Un plan analogue pourrait permettre de maintenir une production dans les secteurs de l'optique.

Une autonomie minimum sur des composants de base est nécessaire pour éviter de dépendre d'une situation de monopole particulièrement critique pour l'industrie de la défense mais aussi pour le domaine du grand public mais elle risque de disparaître dans les années à venir. Un certain nombre d'industriels se plaignent déjà des difficultés d'approvisionnement en composants à l'étranger.

Les industries fortes actuellement vont être à l'avenir fortement concurrencées du fait de la diffusion internationale des technologies. Seule l'anticipation des évolutions techniques permettra de maintenir leur positionnement au niveau des équipements et des systèmes.

Un tel plan permettrait à partir des plate-formes existantes de mettre en place un réseau national concerté de plate-formes technologiques à la disposition de la recherche et de l'industrie.

Ce plan aurait aussi pour objectif de réaliser un meilleur couplage recherche-industrie dans le domaine de l'optique en lui donnant une meilleure visibilité grâce à une identification de son apport spécifique aux composants, équipements et systèmes.

Afin de préciser les thèmes prioritaires à retenir dans le cadre de ce plan une commission pourrait être créée à l'issue de la journée de présentation du livre blanc le 30 mars 2004.

Chapitre 3

Technologie de l'information et télécommunications

Jean-Pierre HAMAIDE *Alcatel*

Christian MARZOLIN *Opticsvalley*

Claude ARTIGUE (Alcatel R&I, Marcoussis)

Alain BARTHELEMY (IRCOM Limoges)

Pierre CHAVEL, Gilles PAULIAT (LCFIO, Orsay)

Eric DELEVAQUE (Highwave, Lannion)

Jean-Pierre HUIGNARD (Thales Research & Technology)

Yves JAOUEN (ENST-Paris)

Suzanne LAVAL (IEF Orsay)

Ariel LEVENSON (CNRS-LPN – Marcoussis)

Hervé MAILLOTTE (LOPMD – Besancon)

Jean-Marc MEROLLA et Laurent LARGER (CNRS, Georgia-Tech Lorraine, Metz)

Gérard MONNOM (LPMC Université Nice)

Jean-Louis OUDAR (CNRS-LPN – Marcoussis)

Philippe REFREGIER (Institut Fresnel Marseille)

Richard RIZK (SIFCOM (ex-LERMAT), Caen))

Pierre SANSONETTI (Alcatel Fibre Optique, Conflans Ste Honorine)

Jean-Claude SIMON (ENSSAT – Lannion)

Patrick VANDAMME, Michel JOINDOT, Jacques ABIVEN (France Telecom R&D, Lannion)

1 Expert : Alain Barthélemy, IRCOM, Limoges
Propos recueillis par JPH

Thèmes de recherche et développement

- Fibres photoniques, avec possibilité d'exploiter la présence d'un gaz ou d'un liquide dans les alvéoles et guidage monomode dans les fibres à cœur creux (à bande interdite)
- Fibres DCF amplificatrices
- Fibres à guidage par effet Bragg de technologie MCVD ; décalage de zéro de dispersion, mode à très large section, guidage dans une fibre creuse
- Lasers à fibre, combinaison cohérente, régimes à modes synchronisés, fonctionnement déclenché
- Source très large spectre à fibre optique non linéaire
- Caractérisation cohérente d'impulsions brèves, mesures de non linéarités, de propriétés dispersives
- Commutation spatiale rapide, avec des matériaux à non-linéarité $\chi^{(2)}$ dans les guides planaires, et miroirs non linéaires en boucle, phénomènes solitons.
- Micro et nanostructuration de guides d'onde LiNbO₃ pour l'exploitation des capacités des bandes interdites photoniques en milieu non linéaire.

Applications industrielles visées

Les applications se trouvent dans le domaine des télécommunications bien sur (dont les fibres non linéaires, les opérations non linéaires rapides, l'amplification paramétrique) mais le plus large panel d'applications que j'entrevois se trouve dans les lasers, les capteurs, les fibres creuses pour la transmission et la compression d'impulsions très énergétiques, la télémétrie, les source décalée en longueur d'onde, etc...

Les vendeurs de fibres photoniques s'adressent aux marchés :

des spectroscopistes et de la tomographie optique cohérente (lumière blanche de type supercontinuum, plus large spectralement que les diodes électroluminescentes)

des laseristes (ampli double gaine à fortes ouvertures numériques, pour applications fortes puissances)

La thématique consacrée à la commutation spatiale est aujourd'hui exploratoire, en attente d'un milieu de propagation qui donnera des puissances compatibles avec le domaine des télécommunications. Les BIP sur LiNbO₃ sont en cours de développement technologique avec des visées sur les microcircuits optiques intégrant sur une seule puce source (avec du LiNbO₃ dopé), modulation, conversion en longueur d'onde, mux-demux en longueur d'onde, etc...

Marchés et entreprises concernés

Outre le domaine des télécommunications, les applications principales concernent les amplificateurs de très forte puissance (plus de 50 Watts), pour l'usinage et le marquage ; cette technologie permet d'obtenir des sources compactes, légères, fiables et sans entretien.

Le domaine de l'imagerie et de l'imagerie biomédicale en particulier est également concerné.

Verrous scientifiques et technologiques

En ce qui concerne les fibres photoniques, il y a peu de problèmes scientifiques de base ou de physique fondamentale si ce n'est la réduction ultime des pertes et au niveau de la biréfringence, il reste à déterminer la part de la biréfringence venant de la forme et des contraintes.

Les problématiques principales concernent la technologie et les processus multi-étapes de réalisation, le remplissage des trous par un gaz, l'isolation des trous de l'air ambiant, le couplage de la lumière dans ces fibres. Pour les amplificateurs double gaine à gaine d'air externe, il reste à trouver des techniques astucieuses de couplage transverse.

Il faudrait mener une réflexion sur l'identification des applications les plus prometteuses parmi toutes celles, très nombreuses, offertes par les fibres photoniques. Pour les techniques de commutations spatiales rapides, il faut rester attentif aux solutions potentielles, telles : les SOA (qui gagnent en vitesse), les micro-résonateurs non linéaires (mais avec le compromis vitesse/énergie de commande), et les structures à bande interdite de photon.

Recommandations

Dans le cadre des fibres photoniques et des fibres optiques en général :

Les technologies fibres réclament plus de temps et de personnel hautement spécialisé que de matériel et d'équipement. Il existe une plate-forme CNRS (IRCOM-LPMC), et des plate-formes industrielles (Alcatel, Highwave Optical Technologies) dont une bientôt dans une structure associative ouverte (PERFOS). Il manque une vision nationale de l'enjeu, et l'on trouve plus facilement des moyens financiers pour le matériel que de moyens humains. Il y a un danger de multiplication de plates-formes de fabrication de fibre, alors que les plates-formes existantes seraient largement susceptibles de répondre aux besoins de l'innovation et de la recherche en ce domaine avec simplement un renforcement humain. A mon sens il est hautement préférable de renforcer les pôles existants, car la compétence technologique est longue à mettre en place, et d'éviter la dispersion des moyens ou alors de créer des plate-formes s'appuyant sur des technologies complémentaires innovantes.

Les RTP (Réseaux thématiques pluridisciplinaires) du CNRS permettent de coupler quelques labos sur des thèmes précis. C'est une filière de soutien souple à renforcer. Il faudrait mener une réflexion pour trouver des applications dans d'autres domaines aux technologies développées pour les télécommunications. Des moyens devront être rendus disponibles pour ces nouveaux domaines

Pour compléter le bon lien actuel entre experts des fibres et des lasers, il faudrait mobiliser la communauté chimie des matériaux et créer des liens avec eux.

Pour le domaine de la commutation rapide :

Il y a besoin de faire se rencontrer les trois communautés spécialistes ; celle des semi-conducteurs, celle des télécommunications et celle de la propagation non linéaire. Il est en effet impossible de suivre seul les progrès de chacune des communautés. Le cloisonnement actuel est trop fort, et l'organisation de rencontres pourrait relancer la motivation

D'un point de vue général de la recherche publique, il y a une grande disparité entre la façon dont sont perçues les activités fondamentales et les applications. Par exemple, les dossiers des chercheurs sont évalués selon les publications et les brevets. Par contre, les personnes intéressées par la valorisation industrielle voient leurs actions peu reconnues dès lors qu'elles ne débouchent pas sur publication (par exemple, la valorisation industrielle peut empêcher les publications ou ne pas être suffisamment innovante pour cela). Pourtant il s'agit bien d'une exploitation des compétences scientifiques d'un chercheur ou d'une équipe au bénéfice d'un industriel ou d'une PME.

Il y a un manque de réactivité vis-à-vis des sujets de recherches émergents. Par exemple, il faudrait des moyens de soutien rapide pour explorer des voies nouvelles et même risquées (par exemple, la décision de lancer une nouvelle activité exploratoire de 6 mois devrait pouvoir être faite en moins de 2 mois). Une solution complémentaire pour éviter de suivre avec retard des pistes nouvelles, un réseau de veille mais souple, devrait permettre de souligner ce qui est apparu comme le plus pertinent, le plus novateur, lors d'un congrès, dans une publication, etc...

Orientations futures

Les axes de recherches importants pour les fibres photoniques et classiques pourraient venir de :

l'étude des matériaux, tels les chalcogénures ou d'autres types de verre et les polymères (par exemple pour de fortes non-linéarité)

l'étude de matériaux utilisables à d'autres longueurs d'onde pour les applications hors télécommunications

l'intégration de nouvelles fonctions, telles les absorbants saturables (de type chrome Cr⁴⁺)

l'intégration de boîtes quantiques dans des matrices vitreuses pour ainsi modéliser à volonté les bandes d'amplification (par opposition aux ions)

Positionnement de la France

Pour les fibres :

En France, il y a une très forte compétence en modélisation (propagation linéaire ainsi que couplage avec non-linéarité). La force de la France est de compter toutes les compétences requises. Il y a cependant un retard au niveau technologique, avec des moyens humains et financiers beaucoup plus importants Outre-Manche (Université Bath, Blaze Photonics), ainsi qu'en Allemagne et au Danemark.

Au niveau de la commutation rapide :

Il s'agit d'un point fort en France du point de vue fondamental (avec Besançon, Dijon, Limoges, ...). Des labos très actifs se trouvent aussi en Allemagne, Angleterre, USA, Canada et Australie. Le Japon semble avoir une vision plus appliquée.

Formations

L'enseignement de l'optique (générale) tend à se réduire dans de nombreuses filières universitaires qui n'étaient pas centrées exclusivement sur l'optique, mais où cette discipline apparaissait comme complémentaire. On enseigne donc moins l'optique de façon générale et cette compétence se réduit en se focalisant désormais sur les seules formations spécialisées (ESO par exemple). C'est regrettable à un moment où son domaine d'application se diversifie encore plus. À mon sens il serait souhaitable de maintenir un enseignement de base sur les lasers et l'optique.

2 Experts : Pierre Chavel, Philippe Réfrégier

Propos recueillis par CM

Thèmes de recherche et développement

Dans le domaine des télécommunications :

- Conception et caractérisation de sources de lumière de haute qualité spectrale et spatiale pour les télécoms
- Sources compactes solides de haut rendement énergétique
- Emission de photons uniques à la demande pour application à la cryptographie quantique à variables continues
- Circuits intégrés optiques structurés sub-longueur d'onde appliqués notamment à la maîtrise de l'émission stimulée
- Optique pour la lithographie X
 - Matériaux électrooptiques en couche mince

Dans le domaine de l'ordinateur optique : après la prise de conscience de la possibilité de traitement massif, mais linéaire, d'information par voie optique dès les années 1950, puis de la possibilité d'opérations non-linéaires se rapprochant d'un seuillage, la question d'un éventuel traitement tout optique de l'information, voire d'ordinateurs optiques revient de façon récurrente. Dans la situation actuelle, la satisfaction de très nombreux besoins de calcul par la technologie du silicium incite plutôt à parler du rôle de l'optique dans l'informatique, ou opto-informatique.

Applications industrielles visées

- Compréhension de l'origine et diminution du bruit dans des diodes lasers télécoms
- Développement de sources utilisables en cryptographie quantique
- Optimisation de lasers de pompe

Marchés et entreprises concernés

- Alcatel, Thales...
- Application aux réseaux optiques télécoms (mais il existe également des domaines d'application extérieurs à la thématique « optique pour les technologies de l'information et des télécommunications ; en outre, il était explicite lors de la discussion que l'application de l'optique au stockage était traitée sous une autre rubrique)..

Verrous scientifiques et technologiques

- Augmenter l'efficacité du rendement quantique en gardant un dispositif compact et en contrôlant l'instant de production des photons
- Maîtrise du matériau micro- et nano-structuré

Recommandations

- Réduire le morcellement des organismes publics et privés ou les inciter plus efficacement à mieux mutualiser certaines recherches
- Éviter des blocages dans les partenariats en trouvant des modalités de partage équitable et surtout simple de la propriété industrielle, qui entrave souvent lourdement et inutilement l'établissement de collaborations
- Permettre aux projets un accès aux sources régionales de financement même quand un des partenaires est dans une autre région (grâce par exemple à une entente entre régions)
- Même remarque pour les autres collectivités locales

Question posée sur les réseaux de recherche et innovation technologique (du FRT)- Un rôle important et à amplifier du financement par les réseaux de recherche technologiques est l'orientation vers des sujets lisibles et compréhensibles par le public et les pouvoirs politiques

- Une impression négative de clientélisme est parfois donnée par ces réseaux malgré la bonne foi des commissions d'attribution, il faudrait davantage de diversité ou de mobilité

- ces deux dernières remarques d'appliquent aussi à la plupart des autres modes de financement incitatifs.

Orientations futures

Ces domaines sont liés aux nanosciences et ont pour but ultime le contrôle cohérent des interactions et processus à l'échelle moléculaire. Ils ouvrent également sur l'information quantique.

Dans le domaine de l'ordinateur optique : Cinq directions se dégagent:

- les traitements très rapides, modérément parallèles peuvent être indispensables pour la commutation dans les télécommunications et des solutions tout optiques sont activement recherchées. Il y a là un enjeu important où les laboratoires français sont en bonne place.
- Dans le domaine du traitement analogique, la technologie actuelle des modulateurs optiques permet d'innover en matière d'imagerie (par exemple pour des données tri-dimensionnelles ou polarimétriques) et d'y associer des prétraitements optiques. Des collaborations se montent entre laboratoires français sur ces questions, qui relèvent davantage de l'acquisition que du traitement.
- L'optique reste par ailleurs fortement sollicitée pour le stockage. La croissance de la densité volumique de stockage reste un défi qui peut impliquer des compétences françaises.
- L'optique, elle est évidemment omniprésente dans l'affichage, traité par ailleurs.
- Le développement de composants à faible coût et compacts peuvent avoir un impact sur les interconnexions à l'échelle décimétrique ou centimétrique dans les systèmes informatiques. L'opportunité de renforcer les recherches en France dans ce domaine dépendront de l'intérêt industriel manifesté, qui reste actuellement modeste.

Positionnement de la France

La recherche française dans le domaine de l'optique des télécommunications est toujours dans la phase de sortie du monopole qu'avait le CNET. Le système actuel provient d'une distribution arbitraire de cette thématique à quelques rares laboratoires (au demeurant de bon niveau). L'accès à la technologie est très limité pour les autres laboratoires et la sensibilisation à ce domaine y est encore limitée ; la situation actuelle du financement de la recherche et du secteur des télécommunications n'y aident pas.

Dans le domaine spécifique des systèmes télécoms, la situation est encore plus malthusienne. Il existe une méfiance du milieu professionnel envers la recherche publique, doublée d'un mépris assez général de la recherche publique envers les thématiques « systèmes » ainsi que de barrières financières pour l'instant incontournables. Si l'on excepte les records de performances du leader industriel européen, la recherche française dans les systèmes télécoms n'est pas du tout compétitive sur le plan international.

En revanche, dans le domaine des composants et des sources, la recherche française n'est pas loin des leaders mondiaux.

Formations

- Manque de formation à la technologie, aux salles blanches et aux systèmes optiques télécoms, probablement due à un manque de sensibilisation des étudiants et à un déficit d'image de ces disciplines
- Cette sensibilisation peut se faire par exemple en introduisant dans les niveaux L et M des options sur la technologie, ou en incitant des stages, y compris de courte période, en entreprise
- L'accès des étudiants à ces équipements parfois chers doit être encouragé par ces stages et passe aussi par la mutualisation des équipements entre différents laboratoires et entreprises.
- Ceci diminuera également la décorrélation qu'il peut y avoir entre le besoin industriel et l'offre de formation

3 Expert : Eric Delevaque, Highwave Technologies **Propos recueillis par CM**

Thèmes de recherche et développement

- Solutions d'amplification optique pour télécoms : étude de nouvelles conceptions pour réduire le coût du produit et l'amélioration de ses performances
- R&D sur les fibres à pompage par la gaine, les fibres microstructurées
- Utilisation du pompage par la gaine, de diodes ruban forte puissance à large bande, optimisation de la platitude du gain sur la bande considérée

Applications industrielles visées

- Réseaux optiques télécoms de transport (sous-marin et terrestre)
- Découpage spectral de source à spectre large, pour accès optique FTTx et Verrouillage de longueur d'onde d'émission par injection dans des diodes lasers FP

Marchés et entreprises concernés

Les entreprises concernées sont les équipementiers télécoms. Le marché de l'accès optique est principalement asiatique, sinon tous les marchés mondiaux télécoms sont visés..

Verrous scientifiques et technologiques

La R&D est essentiellement incrémentale et porte sur du développement technologique. Des questions scientifiques plus fondamentales existent pour les fibres microstructurées.

Difficultés à intéresser les acteurs pour développer de nouvelles diodes de pompe.

Difficultés à tirer profit de collaborations avec des laboratoires publics qui ne vont pas assez loin dans la valorisation de leurs résultats

Recommandations

Le soutien obtenu auprès de l'Anvar-Bretagne est très approprié pour une PME comme Highwave : facile à mettre en œuvre et rapide, contact avec des interlocuteurs facile, appréciation pertinente. Les projets RNRT ont également un effet favorable, même si le démarrage est un peu long. Les projets européens IST sont inadaptés car trop lourds.

L'ensemble des aides à l'innovation technologique et des réseaux est trop dilué et complexe. L'Anvar devrait avoir un rôle plus important.

Orientations futures

L'optique aura une place très importante dans le futur des télécoms avec des besoins en amplification croissants. Mais le domaine des fibres optiques a une évolution très préoccupante en France (et en Europe) car il est à peine soutenu pour traverser la crise, contrairement à ce qui se passe aux États-Unis. Le tissu industriel français a presque disparu alors que son positionnement international était excellent jusqu'au milieu des années 90.

Cette tendance semble encore réversible si des actions fortes sont mises en place (voir par exemple l'initiative de plateforme technologique sur les fibres spéciales PERFOS en Bretagne).

Il faut aussi noter que la bulle internet a permis des avancées technologiques considérables en optique et ces technologies ont maintenant des applications dans d'autres domaines, permettant de trouver quelques ressources pour maintenir partiellement ce secteur industriel

Positionnement de la France

L'optique aura une place très importante dans le futur des télécoms avec des besoins en amplification croissants. Mais le domaine des fibres optiques a une évolution très préoccupante en France (et en Europe) car il est à peine soutenu pour traverser la crise, contrairement à ce qui se passe aux États-Unis. Le tissu industriel français a presque disparu alors que son positionnement international était excellent jusqu'au milieu des années 90.

Cette tendance semble encore réversible si des actions fortes sont mises en place (voir par exemple l'initiative de plateforme technologique sur les fibres spéciales PERFOS en Bretagne).

Il faut aussi noter que la bulle internet a permis des avancées technologiques considérables en optique et ces technologies ont maintenant des applications dans d'autres domaines, permettant de trouver quelques ressources pour maintenir partiellement ce secteur industriel

Formations

Les formations en optique sont satisfaisantes pour le recrutement. Il manque au niveau des ingénieurs une formation qui soit à la charnière entre l'optique et la micromécanique. Ceci est compensé actuellement en recrutant des ingénieurs mécaniciens qui sont ensuite formés à l'optique par l'entreprise.

2 Expert : Jean-Pierre Huignard, Thales

Propos recueillis par JPH

Thèmes de recherche et développement

Les thématiques de recherches dans le domaine des micro-ondes (jusqu'au TéraHertz) sont :

Liaisons optiques hyper-fréquences point à point, par modulation analogique dans la gamme 1-60GHz. L'intérêt est de proposer une liaison optique sur fibre sans interférence électromagnétique, mais qui aujourd'hui n'a pas toujours les qualités des liaisons RF classiques entre antenne radar et unité de traitement.

Application de ces liaisons à la commande optique d'antenne à balayage en mode émission et réception et, impliquant le contrôle fin de la phase et des retards. (par exemple avec 32x32 éléments, voire 100x100 éléments)

Application au traitement optoélectronique de signaux à très large bande.

Points critiques vis à vis des performances des liaisons optiques hyper: l'amplification à très faible bruit et sans distorsion des signaux RF sur porteuse optique; la réalisation de composants lasers semiconducteurs à faible RIN; les photodétecteurs à haut niveau de saturation pour la conversion optique – hyper.

Le stockage sur disque optique est un grand succès des techniques optiques. L'information digitale est lue sans contact tête-support, et la copie s'effectue à bas coût par simple pressage et polymérisation. Ces propriétés spécifiques à l'optique justifient pleinement le succès des applications CD et DVD. Par contre les densités de stockage en optique typiquement 5bits par micron carré sont inférieures au magnétisme qui atteint 100bits par micron carré. L'optique doit encore progresser pour les applications informatiques à la fois en densité et en débit de lecture. La vitesse de rotation du disque ayant des limites, on cherche à introduire au niveau labo des notions de stockage 3D et de lecture parallèle ou multi-pistes avec des lasers à longueur d'onde bleue. Il reste sur ce thème un potentiel d'innovation important. La France a été au premier plan pour les recherches et brevets de base CD et DVD au LCR de TH-CSF, par contre peu d'activités aujourd'hui sur le thème stockage. Le stockage holographique a été repris par un certain nombre de labos et petites entreprises surtout aux US dans la perspective d'obtenir à la fois la densité par multiplexage spatial de l'information et des débits multi-giga bits dus à la lecture parallèle.

Applications industrielles visées

Le domaine de l'optique micro-onde donne lieu à des maquettes de démonstrations en labo: commande optique antenne, liaisons hyper sur porteuse optique. Ces dernières seront intégrées dans certains types d'équipements radars. Les fonctions de traitement seront exploitées dans des architectures hybrides optique/électronique mais sont considérées encore comme des études de base. On peut aussi penser à des comm RF à haut débit en espace libre. Les applications industrielles du stockage optique concernent donc les deux aspects du domaine: l'informatique, le grand public type pour CD – DVD.

Marchés et entreprises concernés

Les applications principales au sein de THALES sont le domaine de la Défense: radars de surveillance, radars embarqués, antennes pour le spatial TH est certainement la seule entreprise maîtrisant à la fois la technologie des composants spécifiques à ces applications ainsi que les architectures de systèmes.

Thomson MultiMedia, pour les applications vidéo et informatiques.

Verrous scientifiques et technologiques

Liaisons Optiques RF :

- Besoin de composants spécifiques, différents du domaine des télécommunications civiles, en particulier: stabilité de fréquence, la pureté spectrale du mode. Ces composants sont: laser SC monomode à très faible bruit RI, modulateur à faible Vpi, photorécepteur,

packaging, amplificateur optique analogique. Autre point important : disposer de photodétecteurs large bande à haut niveau de saturation pour générer un signal hyper de puissance convenable.

- L'amplification par un EDFA d'une porteuse optique modulée par un signal analogique RF analogique ne satisfait pas toujours aux critères de qualités des radaristes.

Parmi les problématiques scientifiques qui se rattachent à ce thème: notons la suppression de porteuse optique par filtrage adaptatif (par exemple par effet Brillouin), les photo-détecteurs hyperfréquences à très forte puissance de saturation, la modulation BLU (bande latérale unique). A plus long terme, les techniques réduction du bruit, les nouveaux composants optoélectroniques 'Quantum dots', les polymères pour modulateurs à très faible Vpi, les mécanismes d'amplification optique à très bas niveau de bruit, les micro cavités, des architectures de traitement de signal opto – hyper ...

Stockage optique.

Les activités principales dans le domaine du stockage visent à augmenter le couple capacité-débit. Parmi les solutions, notons :

- Le laser bleu vers 400nm, pour le gain en capacité, voire une extension vers le proche UV
- Les systèmes multicouches, avec un seul système de lecture/écriture
- Les matériaux et mécanismes NL adaptés au stockage 3D.
- Les nouveaux concepts de lecture optique de disques 3D permettant le suivi des pistes en profondeur.

Recommandations

Des moyens supplémentaires pourraient être trouvés à travers une plate-forme technologique semi-conducteur, avec des activités sur les composants optoélectroniques dédiés aux applications opto-hypers et optroniques. L'optronique vise généralement des sources laser SC émettant dans des domaines de longueur d'onde plus variés tels que proche IR ou IR lointain 12 microns voire jusqu'au Terahertz. (Lasers à cascade quantique)

Orientations futures

Parmi les orientations et applications futures de l'optique et micro-onde, notons quelques exemples:

- De nouvelles architectures pour le traitement optoélectronique du signal
- L' intégration de fonctions optique/ hyper sur le même module.

La technique du Lidar-Radar, qui présente l'avantage de la directivité de l'optique et qui exploite un traitement du signal type radar pour déterminer les paramètres distance et vitesse des cibles.

- Les micro-cavités pour réaliser une fonction de filtrage étroite
- La génération de fréquences TeraHertz, via battement de deux modes, optique non linéaire, impulsions femtosecondes. Les applications visées concernent l'imagerie et sécurité, le médical.

Pour le stockage, l'orientation future majeure est le stockage 3D, peut être un rôle joué par les techniques d'holographie, avec une reprise des travaux aux US et au Japon sur ce sujet. Le besoin/application sous-jacent pour les différents systèmes est le stockage informatique ou vidéo très haut débit. On dispose aujourd'hui des composants de base nécessaires aux architectures de ces nouvelles mémoires 3D: lasers bleus, matériaux photopolymères, détecteurs CMOS, disques multicouches ...

Le stockage 2D par technique du champ proche fait partie également des pistes novatrices.

Ces domaines présentent un grand potentiel d'innovation. De nombreuses entreprises en Asie travaillent sur ces sujets ayant un fort impact industriel. En Europe, Philips, Thomson multi média, le Leti.

Positionnement de la France

· En France, les acteurs académiques pour les composants hyper sont l'IEMN de Lille (composants électroniques pour génération et détection hyper), pour l'optoélectronique, IEF, opto-hyper INPG Grenoble, Université de Chambéry. Thales est le seul industriel, avec les activités de recherche et développement de démonstrateurs avec maîtrise de la technologie des composants de base. A l'international, aux USA avec Hughes, Raytheon, NRL, U de Santa Barbara. Plusieurs labos US sont actifs dans le nouveau domaine de rayonnement TeraHertz. Quelques références d'articles montrant les acteurs :

(Optique microonde; Optical processor for X band antenna, University of boulder; Balanced electroabsorption modulator, UCLA; Phase noise in locked laser diodes, UCLA; Dispersion based photonic antenna beamforming, NRL; Radio signals on an optical subcarrier, Toshiba; Fibre radio system, U of Melbourne; MQW modulator for RF fibre applications, U college . UK; Photonic beam former for antennas, TNO electronic lab. NL; MM wave electro absorption modulator, U of Duisburg Grmany; MM wave fiber radio, U of Osaka; Radio on fiber networks, U of Osaka; Microwave opt. interconnect in phsed array radars, Daimler aerospace Germany; 60 GHz fiber radio on fibre, NTT Photonics lab; Photonic analog to digital conversion at 10 GHz, Hughes Research)

A propos du stockage, Thales mène sur le sujet un travail de veille et de prise de brevets. Le LETI semble reprendre cette thématique. En Europe, notons Philips Hollande, et l'Allemagne qui fait preuve d'un certain soutien. Le Japon, Taiwan et la Corée sont fortement impliqués. Par contre, il semble que les USA dépendent beaucoup de la recherche menée au Japon.

En prenant pour référence le meeting 'Optical data storage' (Mai'03), on constate une domination évidente des labos japonais. Je note 13 papiers US et 32 Asie. Pour l'Europe 3 papiers de Philips, 1 LETI et 1 de Thales TRT.

(Optical drive for use in portable devices, Philips; Ultra small optical drive, LG electronics Seoul Korea; 20GB capacity optical disc, Sanyo; Optical pickup using mutiple beams, Sony; 15Gbit /inch² with mageto optic disc, Sony; Quadruple recording layers for blu disc system, TDK Japan; Phase change media with 20GB capacity, Toshiba; Phase change disc ... Samsung, TDK Corp Japan; Dual level inorganic blu ray disc, LETI; Optical disc structure ..., Data storage institut Singapour; Dye based recording ..., Fuji film Japan; Novel optical disc masterin g..., JVC Japan; Electron beam mastering for 100GB disc capacity, Sony; High density near field readout for 100GB capacity, Sony)

Formations

2 Expert : Yves Jaouën, ENST

Propos recueillis par CM

Thèmes de recherche et développement

Recherche pluridisciplinaire (propagation, formats de modulation, traitement “tout-optique” des signaux) sur :

- Théorie et modélisation des amplificateurs et des lasers à semi-conducteurs
- Techniques avancées de caractérisation des signaux optiques
- nouvelles fonctions optiques (Récupération d'horloge, régénération, ...)
- Systèmes de communications numériques optiques
- Nouvelles technologies d'amplification
- Nouveaux formats de modulation
- Extension de l'utilisation de technologies Télécoms à d'autres domaines

Applications industrielles visées

- Systèmes de télécommunications haut débit (Réseaux de transport, Réseaux métropolitains)
- Développement de technologies bas coût pour les Réseaux d'accès
- Militaire, Industrie, Médecine (Lasers et amplifications à fibre de puissance)

Marchés et entreprises concernés

- Télécommunications optiques : équipementiers (Alcatel, Avanex, Highwave, Keopsys, Teem Photonics, Photline, ...)
- Autres secteurs :
 - LIDAR (Keopsys, Thales, Airbus, ...)
 - Communications spatiales (Alcatel Space, Astrium)
 - Marquage laser : secteur à très fort potentiel (Puissance 10-100 W)
 - Recherche scientifique : lasers et amplificateurs de très fortes puissances (Thales, Keopsys)

Verrous scientifiques et technologiques

- Composants bas coût pour les réseaux d'accès
- Traitement tout optique des signaux.

Recommandations

- Définir secteur par secteur les réseaux de coopération et de financement (financement au cas par cas, crédits d'impôts, programmes nationaux ou européens, ...)
- Accès plus facile aux composants, à la technologie,
- Plate-forme d'échange technologique non industrielle (plates-formes système ENSSAT & ENST, plate-forme MOT du CEA/LETI, plate-forme firme IRCICA, Outils de caractérisation (OLCR de l'ENST))
- Accès à des projets de recherche de petite taille pour des sujets amont et risqués, permettant de financer une thèse:

Orientations futures

- Encore quelques développements autour de l'amplificateur Erbium
- Amplification Raman et diodes de pompe
- Laser et amplification de forte puissance (pour des applications non télécoms)
- La recherche publique sur les systèmes 40G et 160G doit être maintenue à un niveau minimum car elle est très coûteuse et la barrière à l'entrée est haute
- Favoriser des nouvelles solutions technologiques bas coût pour les réseaux d'accès

Positionnement de la France

Amplification Télécoms : bon positionnement de la France, mais ce sujet est mature donc c'est un sujet marginal pour la recherche publique

Amplification de puissance : secteur en démarrage en France, avec du retard par rapport à d'autres pays, qui mérite d'être comblé.

Nécessité de favoriser de plates-formes technologiques publiques pour la conception de composants bas coût pour les réseaux d'accès

Formations

2 Expert : Suzanne Laval, IEF

Propos recueillis par CM

Thèmes de recherche et développement

Étude et réalisation de composants microphotoniques sur SOI pour les télécommunications optiques et les interconnexions optiques dans les circuits intégrés CMOS

- Microguides d'ondes optiques en SOI, monomodes, éventuellement insensibles à la polarisation
- diviseurs de faisceaux, virages, miroirs intégrés
- couplage entre fibre optique et microguide avec des très faibles pertes d'insertion
- multiplexeurs-démultiplexeurs (AWG ou superprisme à cristal photonique)
- modulateurs et photodétecteurs intégrés en filière silicium (SiGe/Si) ou Ge, avec des bandes passantes qui atteignent ou dépassent 10 GHz

Les activités couvrent la modélisation (dont 3D), la fabrication partielle, le couplage en bout et les caractérisations optiques.

Applications industrielles visées

Télécoms : l'avantage du SOI pour les composants en optique intégrée pour applications télécoms est son encombrement réduit et sa technologie compatible CMOS, bien maîtrisée.

Projet Interconnexion optique : l'objectif est de démontrer la faisabilité technique et d'évaluer l'apport de l'optique. Certaines briques de base sont validées comme la division de 1 vers 16 et bientôt de 1 vers 64. Les éléments d'interface en entrée et sortie sont étudiés.

Les applications concernent les microprocesseurs rapides : baisse de consommation, synchronisation des blocs situés à différents endroits de la puce, immunité aux parasites électromagnétiques. La distribution électrique d'horloge consomme jusqu'à 70 % de l'énergie et sa limite sera bientôt atteinte pour les microprocesseurs rapides (>10GHz).

Marchés et entreprises concernés

Télécoms : fabricants de composants optiques intégrés (Avanex)

Interco : STMicroelectronics et au niveau international, Intel, IBM, Samsung....

Verrous scientifiques et technologiques

- La compatibilité CMOS impose un système à fort contraste d'indice : la modélisation théorique est plus difficile et doit se faire en 3D ; les pertes optiques sont fortes dans les zones dopées
- La réalisation de sources et de modulateurs rapides intégrés à base de Si
- La montée en fréquence des détecteurs intégrés
- Caractérisations structurales, optique et hyperfréquence

Difficultés technologiques : réalisation de gravures submicroniques (jusqu'à 0,1 μm) de très faible rugosité pour les guides, effets de proximité dans la fabrication des zones à cristal photonique, épitaxies localisées de multipuits quantiques et de matériaux de grandes différences de maille ; tout ceci en prenant en compte la compatibilité avec les procédés CMOS des circuits intégrés

Recommandations

- Nécessité d'avoir des équipements performants en micro et nanotechnologie, dans les laboratoires CNRS ou d'université, pour des démonstrations de faisabilité avec des temps de cycle court, avant le passage à des plateformes préindustrielles comme PLATO (CEA-LETI). Point essentiel : avoir la main d'œuvre permanente nécessaire en ingénieurs et techniciens pour les utiliser et les entretenir. Ces équipements doivent servir la recherche technologique de base.
- Les financements par projet de réseau technologique sont bien appropriés pour ce type de recherche en liaison avec des industriels.

- Enfin, il y a besoin de revaloriser les bourses de thèse et de clarifier leur mode d'attribution.

Orientations futures

L'IEF a été précurseur dans le domaine de l'optique intégrée sur silicium sur isolant, depuis 1987. La microphotonique sur SOI s'est fortement développée au cours des dernières années :

- intérêt croissant de la microphotonique comme solution alternative aux interconnexions métalliques les plus critiques (comme indiqué dans la roadmap ITRS de 2001)
- intérêt naissant dans le domaine des télécoms avant la crise
- intérêt croissant pour le développement de composants innovants à base de cristaux photoniques, notamment sur SOI

Orientations futures : intégration de davantage de fonctions optiques avec la microélectronique, interconnexions entre blocs du circuit intégré et à plus long terme, liens datacoms intrapuce en WDM, nécessaire pour les « systèmes on a chip ».

Positionnement de la France

Le domaine des télécoms est sinistré et l'abandon de la R&D et des contrats de collaboration industrielle pose un gros problème pour l'avenir.

La France est pour l'instant très bien positionnée au niveau international dans le domaine des interconnexions optiques malgré des budgets beaucoup moins importants qu'aux États-Unis par exemple (MIT, Georgia-Tech, Stanford...). Le soutien de STMicroelectronics est un point favorable. Les industriels de la microélectronique internationale (Intel, TI, IBM, Toshiba, Samsung...) développent des circuits sur SOI, ont déjà introduit du germanium et semblent très attentifs à ces études, en attendant des démonstrations plus complètes.

Il faut mettre les moyens pour avancer rapidement si on veut rester au niveau de la compétition internationale.

Formations

Les formations adaptées existent et sont les formations d'ingénieur ou universitaire relativement généralistes avec des compétences en optique, électromagnétisme, matériaux, microélectronique, hyperfréquences et des notions de technologies de microélectronique.

2 Expert : Ariel Levenson, LPN, Marcoussis

Propos recueillis par CM

Thèmes de recherche et développement

- Traitement optique de l'information en exploitant les propriétés non-linéaires de matériaux micro-structurés bidimensionnellement (semi-conducteurs ou fibres à cristal photonique)
- Semi-conducteurs : les effets NL apparaissent sous l'effet d'excitation optique ; on peut ainsi modifier la réponse des dispositifs à la demande, en fonction de la manière dont on les excite ; ces effets sont des déphasages NL, de l'amplification optique, la conversion de fréquence et peuvent induire des fonctions de commutation, d'amplification, de modification du chirp, d'absorption saturable... ; l'intérêt est de disposer d'une même plateforme 2D pour combiner différentes fonctions, elles-mêmes reconfigurables de manière optique. Ces dispositifs fonctionnent en optique guidée ou non.
- Etude de non-linéarités dans les fibres à cristal photonique (la fibre optique présente un arrangement régulier de trous cylindriques parallèles à son axe). Le comportement du mode principal est étudié en régime linéaire et non-linéaire en fonction du profil d'indice ; le problème de l'injection dans la fibre est également étudié. L'utilisation de SNOM combinée avec une résolution spectrale permet d'évaluer les inhomogénéités de la réponse NL et de les relier au profil d'indice. L'objectif est ensuite de contrôler par le profil d'indice les propriétés de dispersion et d'automodulation de phase, en visant la réalisation de dispositifs tels que des boucles NL (NOLM) ou des amplificateurs paramétriques.

Applications industrielles visées

- Les composants à semi-conducteur étudiés pourront entrer dans la réalisation de routeurs ou commutateurs reconfigurables ultrarapides (concurrents des matrices de MOEMS mais avec des temps de réponse de quelques dizaines de ps)
- Des dispositifs de compensation dynamique de dispersion chromatique pourront aussi être réalisés
- Les fibres étudiées permettront la réalisation de régénérateurs 2R tout-optiques, de convertisseurs de longueurs d'onde ou de commutateurs ou multiplexeurs temporels optiques

Marchés et entreprises concernés

- Les applications sont le routage dans des réseaux transparents ou haut débit (WDM ou OTDM)
- Entreprises concernées : Alcatel, FT...

Verrous scientifiques et technologiques

- Semi-conducteurs : la fabrication des microstructures est en passe d'être maîtrisée, sauf en ce qui concerne la gravure profonde, technologie maîtrisée dans très peu de laboratoires européens, y compris français ; la modélisation 3D de ces structures fait aussi défaut, surtout dans le régime non-linéaire

Recommandations

- Recrutement : le recrutement de post-docs est très difficile en raison des temps de cycle nécessaires pour obtenir des bourses, surtout en présence d'une concurrence internationale forte. Il est très rare d'avoir à la fois le bon candidat et le financement. Un système plus réactif d'attribution des bourses serait très bénéfique.
- Le recrutement des thésards est aussi difficile : là, c'est le nombre total de bourses et leur montant qui sont insuffisants.
- Financement de la recherche : il faut maintenir pour les laboratoires un accès simultané et complémentaire aux financements de type ACI (sujets amont, risqués, sans obligation de résultat autres que la science) et aux financements plus ciblés sur les applications (projet

ambitieux par rapport aux applications ayant des obligations de démonstration, limité dans le temps, qui favorise l'échange industriel). Une articulation entre ces deux types de financement pourrait, dans le cas de certaines ACI, être bénéfiques pour les deux ; ceci permettra de donner des critères de qualité scientifique sur le programme de travail et les partenaires de ces projets dont la raison d'être est le besoin du marché. Les appels d'offres à de tels projets d'interface académique-industriel pourront donner, outre les objectifs applicatifs, des orientations scientifiques claires et ciblées, comme cela se passe dans d'autres pays.

Orientations futures

- Les dispositifs optiques à base de matériaux microstructurés donnent lieu à de très nombreux comportements nouveaux. C'est notamment dans l'optique NL que ces phénomènes sont les plus spectaculaires et prometteurs, en raison des forts effets de confinement qui apparaissent. La flexibilité de ces structures permet une ingénierie de la vitesse de phase et de groupe, de la dispersion chromatique, qui ouvre des perspectives dans la manipulation de la lumière par la lumière, dans des systèmes nécessitant de faibles puissances optiques.
- Des nouveaux dispositifs pourront ainsi voir le jour dans des matériaux où l'exploitation pratique de non-linéarités était jusqu'à peu de temps inaccessible.
- Le remplissage des micro-structures par des liquides et polymères va aussi permettre la réalisation de nouveaux capteurs d'analyses chimiques ou biologiques

Positionnement de la France

- Une structuration de ce secteur est en cours grâce à des ACN
- Semi-conducteurs micro-structurés : la F est bien placée dans l'environnement mondial ; elle l'est en fabrication, aux côtés de l'Ecosse, des Pays-Bas ou de la Suède ; elle est correctement placée dans le domaine de la gravure profonde, où des progrès restent encore nécessaires. En ce qui concerne la modélisation, la France suit des leaders comme le MIT ou Stanford, pour les méthodes conventionnelles mais peut se positionner en tant que leader en exploitant des méthodes alternatives peut coûteuses en temps de calcul. Dans le domaine des applications d'optique linéaire et non-linéaire son expertise est compétitive et joue parfois un rôle leader
- Fibres à cristal photonique : la France est globalement en retard par rapport au Danemark et au Royaume-Uni, même si elle est compétitive dans le domaine de la fabrication de ces objets et en modélisation. Une mise à niveau modérée et surtout la sélection d'un faible nombre de sujets d'applications très ciblées, sur lequel faire porter ensuite tous les efforts serait à même de combler le retard. En ce qui concerne les applications de ces fibres aux standards de fréquence, la France n'a pas une position très avancée.

Formations

- Les formations adaptées sont insuffisantes ; un couplage de l'optique et des nanotechnologies serait profitable, pas seulement au niveau doctoral mais aussi au niveau du master (options de DEA par exemple)

2 Expert : Hervé Maillotte, Laboratoire PM Duffieux, Université Besancon

Propos recueillis par JPH

Thèmes de recherche et développement

Le groupe Optique non Linéaire consacre ses activités de recherche au traitement tout-optique de l'information, selon trois axes :

L'optique non linéaire dans les fibres (interactions paramétriques, mélange d'ondes et diffusion Raman stimulée) pour l'amplification optique, la conversion de fréquences et la génération de continuums spectraux.

Les solitons et réseaux de solitons spatiaux en optique guidée planaire, dans des milieux Kerr (CS₂, AlGaAs) et photoréfractifs (LiNbO₃), pour la commutation spatiale ultra-rapide, l'adressage, la génération de guides d'ondes auto-induits par la lumière.

L'amplification paramétrique et la conversion fréquentielle d'images dans des cristaux quadratiques (KTP, BBO, LBO) pour la saisie et le traitement ultra-rapide d'images faibles, bruitées ou rapidement variables.

Applications industrielles visées

Les valorisations industrielles possibles sont :

Pour la thématique fibre:

L'amplification paramétrique dans le domaine des télécoms. Ses potentialités par rapport aux autres principes d'amplification optique (émission stimulée dans les terres rares, Raman) sont en cours d'évaluation. L'amplification paramétrique pourrait également devenir importante dans d'autres niches applicatives en télécoms, comme la conversion de longueur d'onde et la régénération optique.

Il semble que la génération de continuum soit en passe de devenir un domaine important pour les applications. Ces sources blanches compactes et brillantes sont d'un intérêt direct pour l'optique bio-médicale (tomographie de cohérence, microscopie confocale polychromatique), la métrologie et la visualisation (interférométrie en lumière blanche, microscopie optique en champ proche, colorimétrie, projection laser).

Pour la thématique solitons spatiaux:

Les potentialités d'applications des solitons en traitement tout-optique parallèle (commutation spatiale, adressage, bifurcation, multiplexage spatial, ...) sont cependant conditionnées par la levée de points durs scientifiques essentiellement liés au matériau non linéaire (cf. paragraphe « problématiques » ci-dessous)

Pour la thématique amplification d'images:

Les applications de l'amplification paramétrique d'images à l'imagerie de fluorescence résolue en temps (cartographies de temps de déclin de fluorescence à l'échelle picoseconde) et à l'imagerie à travers les milieux diffusants (tissus biologiques épais). Les domaines d'applications pourraient être l'étude de processus de combustion, le biomédical (imagerie de fluorescence, mammographie)

La saisie d'images très faibles, qui fait appel à des concepts d'imagerie spécifiquement quantiques (amplification sans bruit, clonage d'images, corrélation spatiales quantiques) : il s'agit en particulier de réduire le niveau de fluctuations spatiales des pixels d'une image par amplification sans bruit. Une application possible pourrait être l'augmentation du rendement de détection en imagerie infra-rouge, ce qui intéresse le domaine de la défense notamment.

Marchés et entreprises concernés

Les entreprises principalement concernées sont celles de télécommunications (transmissions optiques et développement des réseaux), d'optronique (défense, imagerie) et d'instrumentation biomédicale. Les applications visées ont été décrites au paragraphe

précédent. Ces recherches étant en grande partie au stade amont, l'impact économique et les marchés potentiels restent à évaluer.

Verrous scientifiques et technologiques

Problématique scientifique :

Les limitations actuelles des interactions paramétriques sur fibre sont liées en grande partie à l'apparition prématurée d'un effet parasite, la diffusion Brillouin qui survient bien avant toute autre non linéarité lorsque les ondes utilisées sont monochromatiques. La lutte contre cet effet, par modulation spectrale, s'accompagne de pénalités. La suppression directe et passive de l'effet Brillouin, sans altérer la dispersion chromatique le long de la fibre, serait donc un enjeu important pour le développement des amplificateurs paramétriques.

Le rôle de la cohérence spatiale et temporelle motive actuellement un grand nombre de travaux en optique non linéaire : par exemple, le type de non-linéarité intervenant dans une source à super-continuum a une influence directe sur sa cohérence et conditionne donc ses applications potentielles (très schématiquement, l'effet Kerr ou paramétrique « garde » la cohérence ; l'effet Raman ou soliton radiatif « perd » la cohérence). L'influence de la cohérence initiale, et la décohérence éventuelle du champ, en propagation sur fibre ou en amplification paramétrique sur fibre fait l'objet d'études récentes. Les mêmes questions se retrouvent (pour tous les milieux, Kerr, quadratiques, photoréfractifs) dans le cas de la génération de solitons spatiaux ou spatio-temporels et de réseaux de solitons à partir de sources incohérentes ou partiellement cohérentes ; y sont associées les questions sur l'influence du bruit spatio-temporel et de la cohérence sur l'existence de structures stables et leur stabilité en propagation.

Les applications des solitons spatiaux font appel au compromis rapidité/puissance dans des dispositifs intégrés. Typiquement, les solitons quadratiques et Kerr sont des phénomènes ultra-brefs mais nécessitent une puissance optique forte ; les solitons photoréfractifs sont obtenus avec des puissances très faibles mais l'effet est lent. Le bon matériau, permettant à la fois une réponse non linéaire très rapide, une puissance faible et des pertes minimales, n'est pas encore trouvé. Des amorces de solution sont apportées actuellement avec le LiNbO₃ périodiquement inversé (PPLN), certains matériaux organiques à susceptibilité cubique élevée et des semiconducteurs photoréfractifs rapides. À terme, les milieux micro- et nano-structurés seront certainement d'un grand apport pour accroître les non linéarités effectives.

Problématique technologique :

Pour les applications paramétriques, il y a besoin de fibres particulières (classiques ou photoniques), par exemple fortement non linéaires à dispersion 'plate' sur un large intervalle de longueur d'onde. Le contrôle de la dispersion chromatique est un enjeu technologique important dans ce domaine, tant au niveau de la fabrication des fibres que de leur caractérisation. Il est également nécessaire d'améliorer la reproductibilité des procédés de fabrication.

En parallèle avec le développement de matériaux non linéaires aux propriétés optimales, la mise au point de sources impulsionsnelles compactes (microlasers, lasers à fibre, ...) dans une grande palette de longueurs d'onde, avec des puissances crêtes et des taux de répétition augmentés, permettrait également de se rapprocher plus vite de la barrière pour laquelle le tout-optique deviendrait économiquement viable dans plusieurs domaines d'applications.

Recommandations

Une lapalissade : que les télécommunications « redémarrent » économiquement, car il y a plein de bonnes idées en France dans les tiroirs pour le très haut débit dans les fibres optiques et pour le traitement tout-optique du signal, et également parce que la crise a très certainement contribué à stopper les financements institutionnels amonts dans une grande

partie de la discipline « optique et photonique ». Mis à part au niveau européen, mais au prix de montages de projets très lourds et complexes (i.e. prohibitivement coûteux en temps et énergie pour ceux qui ont le courage de les coordonner), le cœur de métier « optique » n'est plus directement financé nationalement et a encore du mal à trouver pleinement sa place au sein des offres nouvelles, plutôt axées sur les « usages » (développement durable, santé, environnement, ...).

Les relations avec les industriels (par exemple Alcatel, Sumitomo pour l'optique non linéaire fibrée) sont nécessaires et doivent s'amplifier : les collaborations existent, mais elles restent trop au coup par coup. Pour l'optique non linéaire, fibrée en particulier, il manque au niveau national un forum de discussions et d'échanges de type GDR, pour réfléchir et fédérer les applications vers le tout-optique. Espérons que les réseaux d'excellence européens puissent pallier ce manque. De même, une seule tour de fibrage en France pour la recherche académique ne semble plus suffisante. Les équipes concernées sont déjà fortement impliquées dans des projets importants, ce qui laisse en gestation d'autres idées et risque de les faire « fuir » à l'étranger.

D'une manière plus générale, le support technique et administratif est très insuffisant dans les laboratoires. Pire, sur le terrain, on a souvent l'impression d'être au service de nos administrations centrales plutôt que le contraire. A une époque où l'on prône l'espace européen de la recherche et où la compétition internationale est exacerbée, les règles administratives et financières publiques françaises freinent trop souvent la réactivité. En particulier, la lourdeur des démarches administratives et le manque de souplesse et d'autonomie quant à l'utilisation des moyens financiers, qui n'est pas laissé aux unités locales, oblige à passer par les marchés publics (on ne peut pas organiser en amont l'achat de matériels de recherche de pointe comme celui de chaises de bureau ou de légumes pour les cantines scolaires !!), et empêche les achats rapides, bloquent ceux-ci (parfois entre novembre et mars !!), empêche souvent les « bonnes affaires » (matériel décoté, ventes aux enchères), etc ... tout ceci conduit à gaspiller au coup par coup une bonne partie du temps et de l'énergie des chercheurs et enseignants-chercheurs qui ont envie de faire avancer leurs recherches efficacement.

Il manque une véritable interface « recherche - monde socio-économique » qui soit capable de venir au devant des chercheurs pour faire une prospective efficace des potentialités d'applications des recherches. Sauf à travailler dans des domaines très finalisés, les résultats de laboratoire peuvent souvent servir à tout autre chose que ce qu'on pouvait imaginer au départ. Les cellules de valorisation de nos tutelles font très bien leur travail pour ce qui est de la brevetabilité, de la gestion des contrats industriels, ... i.e. lorsque l'objet du transfert de technologie est déjà clairement identifié. Mais, d'une manière générale, l'interaction « prospective » est manquante et le mécénat industriel n'existe pas en France, contrairement au Japon ou aux Etats-Unis.

Orientations futures

Ces thématiques et les travaux en cours sur les problématiques citées plus haut s'inscrivent dans le domaine de l'Optique non Linéaire guidée, qui regroupe les activités de nombreux groupes dans le monde. Parmi de grands axes futurs, aptes à résoudre les difficultés scientifiques actuelles :

L'optique non Linéaire dans les microstructures est une orientation importante qu'il faut encourager, et dont l'accès technologique semble de plus en plus facilité, à travers le micro-usinage par laser par exemple. Ainsi qu'on le voit déjà avec les fibres photoniques, l'apport de la nanostructuration des matériaux, thème en plein essor, permettra certainement des avancées majeures pour l'augmentation des non linéarités effectives.

Réalisation d'une fibre 'anti-Brillouin', par exemple de type fibre photonique nanostructurée avec bande interdite hyper-sonore, pour l'amplification paramétrique sans modulation de pompe.

Réalisation de systèmes optiques adressables, par exemple par guides d'onde photo-induits reconfigurables dans des milieux massifs ou microstructurés.

Positionnement de la France

L'étude des effets nonlinéaires dans les fibres est bien couverte en France (Dijon, Besançon, Nice ainsi que Limoges, Lille). Du point de vue 'amont', les activités recherches représentent une proportion importante, de l'ordre de 10-15%, des activités internationales (base de donnée OSA). Ce pourcentage est plus faible dans le domaine applicatif.

Dans l'étude des solitons spatiaux, on trouve des travaux complémentaires selon le type de non linéarité : matériaux quadratiques à Limoges, cubiques à Besançon et Angers, photoréfractifs à Metz et Besançon, cristaux liquides à Valenciennes. Le positionnement international est bon (environ 7%), si ce n'est que l'étude des solitons discrets (i.e. dans des réseaux de guides couplés) n'est pas abordée en France.

Les travaux en imagerie quantique s'inscrivent dans un consortium européen reconnu (6 équipes) auquel sont associées deux équipes américaines de renom. Du point de vue expérimental, l'amplification paramétrique d'images est une spécificité bisontine et, plus récemment, italienne (un groupe à Côme).

Formations

2 Experts : J.-M. Mérola et L. Larger, laboratoire CNRS-Georgia-Tech Lorraine

Propos recueillis par CM

Thèmes de recherche et développement

- Optimisation du débit de transmission optique de données par codage des bits (notamment par codage en phase, qui permet une moindre influence des effets NL en WDM) afin d'augmenter l'efficacité spectrale
- Sécurisation des données transmises par l'utilisation de propriétés physique.
 - Distribution quantique de clés permettant la confidentialité inconditionnelle (mais avec des limites en distance et débit)
 - Autres systèmes à variables continues (pour atteindre 10-100 Mbit/s)
 - Chiffrement direct de l'information (« masquage » par un oscillateur NL en régime chaotique)

Ce système permet encore d'augmenter le débit car seule la bande passante physique des composants d'émission et réception le limite (débit binaire visé : 10G)

- Pour ces sujets, on s'intéresse également à la définition rigoureuse de la notion de niveau de sécurité, paramètre important pour étudier la résistance de ces systèmes aux attaques standards.
- Routage de l'information et oscillateurs optoélectroniques

Applications industrielles visées

Les débits et distances de transmission qui peuvent maintenant être atteints (plusieurs dizaines voire centaines de km), ainsi que la possibilité d'utiliser des éléments de systèmes télécoms standard donnent accès à de nombreuses applications de transmission sécurisée de données. Ce type de transmission peut intéresser les banques, la défense, les satellites, les milieux médicaux etc...

Un projet concerne notamment la démonstration d'un système compact de transmission cryptée en espace libre pour embarquement sur un satellite.

Plusieurs sous-produits de ces projets ont également des retombées (récemment intérêt d'AMD concernant les circuits électroniques utilisés dans le cadre du comptage de photons)

Marchés et entreprises concernés

- Il existe principalement dans le domaine une start-up suisse et une américaine (actuellement une start-up Française est en cours de création) ; des entreprises comme France Télécom (qui détient un brevet important), AMD, Thales ou Astrium peuvent également être intéressées
- Les géants de l'électronique japonais sont aussi très impliqués : Mitsubishi, Toshiba, NEC....

Verrous scientifiques et technologiques

Scientifique : étendre le champ d'application des propriétés physiques utilisées dans le domaine quantique au domaine classique mais aussi trouver d'autres applications potentielles (authentification, « ordinateur quantique », ...)

Technologie : disponibilité de composants à faibles pertes et peu sensibles à la polarisation : canal de transmission (fibre), modulateurs électrooptiques..., réalisation de détecteurs à fort rendement et faible bruit à 1550 nm, réalisation de sources non-classiques.

Informatique : développement d'algorithmes de traitement permettant une augmentation de l'efficacité en termes de débit et de distance de transmission des clés de cryptage.

Recommandations

- Financement de projets : les ACI et les projets réseau technologiques sont intéressants mais gagneraient à prendre en compte le caractère pluridisciplinaire de cette recherche : langage à trouver pour que l'évaluation soit facilitée, possibilité de décrire oralement le projet ; ne pas pénaliser des projets qui ont d'autres sources de financement

- Renouveau des idées : il faut inciter la venue de chercheurs étrangers reconnus pour stimuler les équipes jeunes et générer de nouveaux axes de recherche, par exemple par des conditions financières attractives
- Favoriser les échanges internationaux en alignant notamment les salaires des post-docs sur la concurrence internationale
- le maintien d'une pyramide des âges équilibrée dans un laboratoire est primordial
- Le développement de programmes de recherche pluri-disciplinaires, à la fois théoriques et appliqués (pour les télécom, forte collaboration entre des théoriciens de l'information, des physiciens, des chercheurs en systèmes, en composants, et en technologies de fabrication)

Orientations futures

L'augmentation des distances et débits accessibles par ces systèmes rendront possibles les applications d'authentification ou de routage sécurisé.

De plus, les progrès dans les matériaux et dans la compréhension des états quantiques intriqués et de leur stabilité permettront d'accéder à des fonctions optiques logiques simples, ouvrant la voie au traitement quantique de l'information.

Positionnement de la France

Le domaine de la cryptographie quantique est bien placé en terme de recherche amont et industrielle : la France a été précurseur et a une bonne reconnaissance dans la communauté. Un laboratoire français a été parmi les premiers à étudier les applications de ces systèmes. Mais un retard est en train de se creuser, notamment par rapport à la Suisse et aux Etats-Unis.

Formations

- Recrutement en École d'ingénieur ou Université
- Formations suffisantes de ingénieurs en pratique et technologie mais manque d'esprit « recherche » parfois.
- Favoriser au niveau universitaire les formations liées aux domaines de la télécommunication, en particulier concernant la théorie de l'information.
- Formation internationale au niveau de la recherche, dans le cadre de réels échanges sur des durées significatives (>3 mois).
- Finalement d'une manière plus générale, favoriser une formation complémentaire académique durant le travail de thèse en proposant une série de cours scientifiques obligatoires à suivre.

2 Expert : Gérard Monnom, LPMC, Université de Nice **Propos recueillis par JPH**

Thèmes de recherche et développement

Fibre cristal photonique et fibre à bande interdite de photons

Fibre non cristalline à non-linéarité χ^2 artificiel (polarisation artificielle par poling)

Amplificateurs à terre-rare et fibres dopées ions métalliques, sujets à forte orientation matériau

Création d'une onde cohérente par transfert de cohérence, activité de nature fondamentale

Applications industrielles visées

Pour la fibre cristal photonique, les applications sont :

- Fibres à petite surface effective, pour effets non linéaires exacerbés (transposition de longueur d'onde)
- Fibres à grande surface effective, pour laser de puissance et pour réduction des effets non linéaires dans les lignes télécoms
- Hors applications télécoms, il faut noter le domaine des capteurs, avec la possibilité d'introduire des cristaux non linéaires, des gaz, etc. dans les trous

Pour la fibre à bande interdite de photons:

- Filtres optiques avec réseau de Bragg latéral, de type dite à 'pelure d'oignon' à structure latérale et cœur de silice pure pour les grandes surfaces effectives et pour la réalisation de filtres optiques accordables
- Fibres à bande interdite, avec coeur creux, pour réalisation de fibres de ligne 'sans' perte, pour amplificateur Raman (avec adjonction de milieu Raman dans le trou central)

Pour les fibres à non-linéarité χ^2 :

- Fibre pour exploiter les effets paramétriques, la génération d'harmonique : conversion de fréquences, et réalisation de sources à un photon pour la cryptographie quantique

Pour les fibres dopées aux terres-rares et ions métalliques, il s'agit d'une activité R&D pour applications à long terme :

- Etude de l'élargissement de la bande d'amplification, par la recherche sur les terres-rares/ions métalliques et leurs mélanges
- Amplificateurs en bande S et à bande C élargie pour les terres-rares ; lasers pour métrologie pour les ions métalliques.
- Amplificateurs à fibre chaotique (géométrie non circulaire) pour des puissances de saturation élevées

Marchés et entreprises concernés

Alcatel, pour le domaine des télécommunications. Le marché des capteurs, un marché de niche, manque d'industriels en France.

Verrous scientifiques et technologiques

Fibre cristal photonique ; du point de vue scientifique, le sujet semble bien maîtrisé, avec la compréhension fine des propriétés de propagation et un bon accord théorie/expérience ; un effort devrait être porté sur le calcul de la dispersion. Par contre, l'atténuation doit être améliorée ; ce point est lié aux problématiques technologiques, comme par exemple les questions d'interfaces.

Fibre bande interdite de photon : là aussi, problèmes d'interface très importants et bonnes caractéristiques opto-géométriques transverses à maintenir longitudinalement.

Fibre à non-linéarité artificielle χ^2 : il y a besoin de mener des activités de recherches de base et des activités technologiques, en particulier pour réaliser des polarisations artificielles avec des fronts raides (sub-micron) et/ou sur de grandes longueurs (50cm).

Fibres dopées amplificatrices : contrôle des dopants à l'échelle nanométrique (nanocristallites, mélange de phases, ...)

Les activités restent au niveau fondamental pour le transfert de cohérence.

Recommandations

Le principal besoin est de disposer en France d'une centrale technologique nationale forte, permettant la fabrication des préformes, des préformes dopées, du fibrage (et pré-fibrage) de préformes et de capillaires. Elle existe à Limoges + Nice, peut-être bientôt à Lille. La centrale existante n'a pas assez de clients externes (excepté le CEA pour les capteurs), ce qui peut être dû à un manque d'informations sur les possibilités offertes.

Les solutions sont donc :

- Plus de personnel et rassembler les forces (universitaires et industrielles), et éviter la dispersion des moyens
- Renforcer les contacts public/industrie, à travers une structure de gestion (par exemple, rien n'a remplacé le GDR en optique guidée)
- Des spécialistes de la physico-chimie des verres manquent ; malgré une formation à Montpellier, à tendance théorique.
- Pour les activités sur les fibres à nonlinéarité artificielle, il y a un besoin d'ouverture de thèses
- Pour les activités fibres dopées, il y a besoin de trouver des contacts industriels (relations arrêtées avec Highwave, et réduites avec Alcatel). A noter que ces activités sont partiellement financées à travers des collaborations en dehors de l'hexagone : Russie, Inde et Australie. Un cadre de type GDR est nécessaire pour maintenir des discussions libres. Sur le plan technologique, il est important de ne pas disperser les efforts.

Orientations futures

Les orientations futures sont :

- Le dopage de barreaux (par exemple deux barreaux) à insérer dans la fibre
- La réalisation de capteurs, avec insertion de 'réactifs' dans les trous
- La réalisation de sources blanches ou supercontinuum, par exemple en maîtrisant la structure longitudinale (taper au centre du cristal photonique) lors du fibrage
- D'un point de vue de la physique fondamentale, le guidage d'atomes par la pression d'une onde évanescente.
- Mener les études technologiques pour réaliser et maîtriser des pas plus petits d'inversion de polarisation artificielle
- Par transfert de cohérence, créer une onde cohérente à partir d'une onde bruitée en phase.

Positionnement de la France

La concurrence est forte dans le domaine, en particulier en Europe avec ORC, Université de Bath, et Blaze Photonics (UK), COM et Crystal Fibre (DK), Liekki, Université de Jena. Au Japon, l'on trouve NTT, Sumitomo, aux USA OFS, Uni Southern California.

Sur la partie fibre cristal photonique, les anglais (via ORC et ses premiers travaux en 1995) ont plus de cinq ans d'avance.

Sur la partie fibre à bande interdite, le sujet en est à ses débuts : il faut renforcer les activités sur ce sujet maintenant.

Concernant les fibres à polarisation artificielle, les travaux menés dans le cadre d'une thèse, maintenant terminée, avec l'Université de Bordeaux auraient permis de dépasser les résultats obtenus par ORC (UK), mais qui ne publie plus sur le sujet depuis 6 mois.

Concernant les activités fibres terres-rares, les US poursuivent leurs travaux sur la bande S, pour peut-être s'orienter vers une matrice silice.

Formations

Les recrutements actuels sont basés sur une culture de base en optique mais une formation en matériaux pour l'optique et l'opto-électronique fait défaut.

2 Expert : Jean-Louis Oudar, LPN

Propos recueillis par CM

Thèmes de recherche et développement

- Etude sur les composants absorbants saturables (structure à puits quantique InP à temps de recombinaison accéléré) à fonctionnement vertical (pas d'optique guidée)
- Utilisation pour la régénération de signaux à 10G et 40G (possibilité à 160G mais besoin de puissance plus forte et problème d'absorption)
- Application au mode-locking passif dans des lasers (cavité externe ou cavité verticale) pour la réalisation de sources pulsées
- Réalisation de portes optiques rapides pour la modulation, la commutation, le démultiplexage optique temporel
- Récupération d'horloge tout-optique

Applications industrielles visées

- Module « passif » multicanal en longueurs d'ondes pour régénération 2R (Réamplification + Remise en forme) dans le cadre d'un projet RNRT
- Sources et récupération d'horloge pour le 160G

Marchés et entreprises concernés

- Alcatel et toute entreprise de composants télécoms
- Marché du haut débit et des réseaux tout-optique

Verrous scientifiques et technologiques

- Nouveaux matériaux à croissance délicate (GaAsN)
- Prise en compte des aspects système dans le développement du composant

Recommandations

- Disposer d'une plateforme de test système 40G qui complète les équipements ENST et ENSSAT
- Faciliter le recrutement de thésards par des conditions plus attractives

Orientations futures

- Objectif = diminuer la puissance nécessaire pour le fonctionnement des dispositifs (<1mW) et leur temps de réponse (< ps)
- Maîtrise à l'échelle nanométrique de la structuration latérale des matériaux : nanostructures, boîtes quantiques, cristaux photoniques (modélisation, technologie)

Positionnement de la France

- Bon positionnement de la F (« records » de performance au niveau composant comme système) ; la concurrence a été activée par ces résultats
- Bon effort de CNRS/STIC autour de ces sujets : Réseau Thématique Prioritaire (20 labos sur les composants pour télécoms optiques), permet de mieux répondre aux programmes européens, facilite la mise en place d'équipes projet multi-labos. Idem pour l'action spécifique système « Commutation numérique optique »

Formations

- Les écoles doctorales de la Région permettent une bonne diversité de compétences. Manquent peut-être des candidats DEA ayant des notions optique et système (DEA système très reliés à l'électronique) : mettre en place une option système dans DEA optique.

2 Expert : Richard Rizk, SIFCOM (ex LERMAT), UMR 6176, Caen

Propos recueillis par CM

Thèmes de recherche et développement

- Elaboration de couches minces et de multicouches à base de silice ou de verre spécifique par pulvérisation magnétron réactive (procédé compatible avec le process CMOS)
- Etude de la silice ou du verre co-dopé avec de l'erbium (ou autre terre rare) et de nanograins de silicium pour des applications d'amplification. L'approche multicouche autorise le contrôle de la taille des nanograins de Si (non nécessairement cristallisés) et permet aussi l'ajustement de la distance d'interaction entre l'ion Er et le nanograin Si.
- Intérêt du co-dopage avec de l'erbium et des grains Si : excitation indirecte de l'erbium via le nanograin qui joue le rôle de 'sensibilisateur' absorbant efficacement le photon d'excitation et transférant rapidement l'énergie vers l'ion Er. Ceci conduit à l'augmentation de deux ordres de grandeur de l'intensité de l'émission de l'Er (à 1,54 μm) et de 3 à 4 ordres de grandeur la section efficace d'excitation effective de Er. Chaque nanograin peut exciter plusieurs ions Er voisins. La durée de vie de l'émission de Er* peut atteindre 7 ms pour nos matériaux.

Applications industrielles visées

Les applications visées concernent des composants compatibles avec le process CMOS :

- Guide amplificateur planaire à l'erbium.
- Diode électroluminescente.
- Sources photoniques,
- Interconnexions optiques,
- laser de pompage sous forme de couche de verre spécifique dopé à l'ytterbium pour télécommunications optiques.

Marchés et entreprises concernés

- Entreprises de composants : Agilent, Teem Photonics, Alcatel, Highwave, ...
- Verriers de spécialité : Corning...
- Retombées possibles en micro-électronique : ST, Intel...
- Application : amplification pour télécoms, sources intenses de pompe, interconnexions intrapuces

Verrous scientifiques et technologiques

- Maîtrise de la répartition homogène et optimisation des densités des terres rares et des nanograins via le procédé de fabrication : multiplicité des sites de nucléation, recuit,...
- Synthèse très pure de la matrice
- Micro-analyse pour déterminer les profils de concentration et mesures spectroscopiques pour examiner les liaisons et les configurations des éléments ainsi que la nature des nano-agrégats.

Recommandations

- Possibilité d'établir des partenariats pluridisciplinaires (avec des labos composants, système), y compris la participation à des réseaux thématiques et les contacts industriels,
- Soutien financier adéquat des organismes de tutelle,
- Etoffer l'équipe avec des chercheurs au profil transdisciplinaire approprié avec notamment une culture composants pour valoriser les matériaux et les structures fabriqués et assurer la jonction synthèse-dispositif, avec des retours à l'élaborateur.

Orientations futures

- Elles s'inscrivent dans l'effort fourni pour rendre compatibles ou intégrer les composants optoélectroniques ou photoniques avec la technologie microélectronique classique et notamment celle du silicium
- Evolution vers d'autres matrices et d'autres terres rares

Positionnement de la France

- Peu de laboratoires en F sur la thématique d'émetteurs à base de silicium nanostructuré.
- Fort savoir-faire en Italie (INFM de Catane et de Trente...), aux Pays-Bas (AMOLF, Amsterdam), aux USA (Caltech, Stanford, MIT...), Allemagne (MPI à Halle), GB (IC, Londres), Japon (Tokyo, Kobe) Corée du Sud (KAIST, Taejon),...
- Mais les résultats français sont maintenant compétitifs, le savoir-faire mérite d'être consolidé grâce à l'apparition d'autres acteurs français

Formations

Des formations sur des techniques sophistiquées de microanalyse et de spectroscopie sont toujours demandées et mises en œuvre par le laboratoire. La difficulté réside, cependant, dans le besoin de compétence pour la fabrication et la caractérisation, en partenariat bien entendu, de dispositifs qui doivent aussi faire l'objet de modélisation. Il nous faut donc des postes et des candidats.

2 Expert : Pierre Sansonetti, Alcatel Fibres Optiques

Propos recueillis par CM

Thèmes de recherche et développement

- Recherche et développement sur les fibres de transmission
- Recherche et développement sur les fibres à compensation de dispersion chromatique
- Recherche et développement sur les fibres amplificatrices

Les activités de R&D concernent la modélisation et la réalisation des fibres. Ces produits et ces technologies étant matures, les besoins d'innovation concernent essentiellement l'augmentation incrémentale de la qualité et des performances pour répondre à l'évolution des besoins des concepteurs de systèmes ou des opérateurs télécoms.

Applications industrielles visées

Transmissions optiques point à point sous-marine et terrestre ; transmission optique métropolitaine et dans des réseaux optiques locaux

Marchés et entreprises concernés

Les entreprises concernées par ces technologies sont les fabricants de sous-systèmes (Avanex, Bookham), de systèmes (Alcatel...) et certains opérateurs télécoms

Verrous scientifiques et technologiques

La question principale est liée à la maîtrise du verre et du guide en vue d'optimiser les propriétés de transmission, spectroscopie.

Recommandations

Cette recherche industrielle s'appuie fortement sur la recherche amont publique. Une coordination nationale de la recherche publique sur les fibres optiques serait souhaitable pour lui donner des objectifs scientifiques clairs ; le modèle du GRECO pourrait former une base de départ.

La recherche technologique sur les fibres optiques télécoms n'a pas bénéficié de soutien des réseaux. Il faut que les appels à projets futurs couvrent ces sujets.

Orientations futures

Les fibres à cristal photonique en sont à leurs débuts et semblent très prometteuses d'applications. Les sujets de recherche sur les fibres dopées sont également amenés à des développements intéressants, notamment en vue de la réalisation de lasers de pompe à fibre.

Enfin, l'amplification Raman discrète reste un sujet très exploratoire qui pourrait produire des résultats intéressants dans un futur proche.

Positionnement de la France

Pour la fibre de transmission, Alcatel est n° 1 en Europe et n°3 mondial. La recherche destinée au développement de ces produits est effectuée essentiellement en France.

En ce qui concerne la fibre pour composant, la France est bien positionnée, avec des entreprises comme Alcatel ou Highwave. La concurrence est très rude en Europe, Japon ou aux Etats-Unis.

Formations

Toutes les formations existantes conviennent au recrutement. Nous avons seulement des difficultés au niveau du recrutement de techniciens dans le domaine des procédés de fabrication et de leur optimisation par plans d'expérience.

2 Expert : Jean-Claude Simon, ENSSAT, Lannion

Propos recueillis par JPH, non relu

Thèmes de recherche et développement

Les activités générales concernent :

Physique des lasers : Impulsions brèves (pour OTDM 40-160G), compression d'impulsions, traitement anti-reflet

Fonctions optiques Telecoms : ces activités sont basées sur un consortium entre INSA Rennes (îlots quantiques, étude matériau sans les procédés technologiques, tels que réalisation de guides, reprise d'épitaxie, ...), ENST-B (contrôle polarisation, PMD, cristaux liquides), et ENSSAT

Polymères – optique intégrée : activités prospectives, pour l'étude de guides avec NL khi3 et khi2, avec une préférence pour la non-linéarité khi 3 pour les fonctions tout-optiques, photo-inscription de guide, étude matériau avec Nantes.

Les activités plus spécifiques 'fonctions optiques pour les télécommunications sont :

Régénération optique des signaux (2R/3R) avec composants actifs SOA et passif absorbant saturable ; Fibre non linéaire avec fibre chalcogénure et à micro-structure (pour forte non-linéarité et faible Surface de mode)

Etude de l'architecture du régénérateur, et de l'incidence du bruit sur les performances

Mise en route d'une plate-forme (PERSYST), en cours de passage à 40G. Cette plate-forme ouverte est pour des TESTs et pour la RECHERCHE avec les labos, les opérateurs et l'industrie (PME, ...),.

Transmission en espace libre (intra et extra- bâtiments), à 1,55microns (WiFi optique), avec des activités de modélisation, dimensionnement, et d'étude de disponibilité en fonction de la météo. Peut-être aussi études futures à 3,5 microns. Travaux d'ingénierie, plus que de physique

Applications industrielles visées

Plate-forme de tests de technologies.

Télécommunications – réseau de transport – haut débit

WiFi optique, s'adresse à la problématique de l'accès (1st mile)

Marchés et entreprises concernés

Les entreprises concernées sont celles des télécommunications. Les relations sont aussi fortes vers les PME (par exemple aide en prêt de matériel, apport d'expertise), en particulier envers une start-up pour le traitement multi-couche, et le contrôle in-situ du procédé de fabrication)

Verrous scientifiques et technologiques

Du point de vue 'système', il faut toujours résoudre la question du besoin régénération 3R tout optique, mais il s'agit là plus d'une question d'ingénierie de liaison.

Le tout optique se justifiera si l'on peut diminuer la consommation électrique, maîtriser l'asservissement (3R à SOA). Il y a besoin d'un matériau plus efficace et gagner 1 ordre de grandeur sur les effets NL.

Traitement multi-longueur d'onde en parallèle des canaux. Une piste possible est le choix d'une structure avec un élargissement de raie inhomogène, comme accessible par des matériaux à forte concentration d'îlots quantiques (à régler : dépendance à la polarisation).

Trouver les composants compacts et à faible consommation, fortes non-linéarités. Aujourd'hui, il y a les SOA standards.

Recommandations

Il faut trouver des moyens de financement de plate-forme 'nationale', une fois les crédits d'amorçage obtenus pour lancer l'activité. Un réseau de relations est à construire, avec

un ensemble de labos travaillant sur les questions matériaux, ensuite composants, ensuite les systèmes, ..., le tout avec coordination.

Il faudrait embaucher des ingénieurs au CNRS, pour permettre le fonctionnement des plates-formes. Il faudrait peut-être revoir la distribution des chercheurs/ingénieurs lors des remplacements pour départs à la retraite. Besoin de projets fédérateurs, avec chercheurs, industriels, pour monter les plates-formes, en renforçant cette idée de plate-forme même au niveau français, en particulier à travers le RNRT.

Manque d'accès (fibre spéciale à Lannion, ce qui se complète par Lille sur fibre longue distance). Il y a tout ce qui faut sur le fondamental, mais pas sur l'appliqué. Renforcement de postes technos, ..

Cette culture recherche appliquée est nécessaire en France. Les réseaux, type RNRT, doivent être poursuivis, mais renforcer le soutien des projets optiques.

Orientations futures

La compacité, la consommation, tout en menant la performance. Besoin de matériau.

Positionnement de la France

Fonctions optiques pour telecoms : industrie forte. Faisabilité de technologie démontrée, mais forte concurrence à venir. Il faut encore démontrer et consolider, à travers de nouvelles technologies compactes et moins chères ; vis à vis de la compétitivité asiatique. Etre plus innovants sur les concepts amenant la diminution des coûts, pour contrecarrer le moindre coût de fabrication.

Recherche sur les fonctions : 3 labo : ENST-P, Bourgogne, ENSSAT (depuis 2 ans). SUPELEC sur les composants d'extrémité à 10G.

Formations

Eviter la spécialisation trop marquée pour éviter les échecs dans les situations difficiles

2 Expert : Patrick Vandamme, Michel Joindot et Jacques Abiven, FranceTelecom R&D Propos recueillis par JPH

Thèmes de recherche et développement

Les activités menées sont orientées vers le bon usage des innovations technologiques, en gardant une capacité de recherches, de compréhension et d'application des avancées, afin de conserver la maîtrise des évolutions techniques des réseaux. L'optique et les technologies associées sont donc considérées comme essentielles pour les applications de transport et d'accès.

Au niveau du transport, les domaines principaux d'activités sont : l'étude des caractéristiques du milieu de transmission, l'ingénierie des systèmes, la métrologie, et l'étude des fonctions optiques et de leur apport au réseau.

Au niveau de l'accès, il s'agit d'évaluer l'apport d'un changement de technologie d'accès pour dépasser les limites de la technologie 'cuivre', qui ne permettra pas à terme de faire face au large déploiement de nouveaux services vers les abonnés et les entreprises. Les principales activités sont centrées autour de l'architecture de réseau et de l'évolution des protocoles de bout en bout.

Applications industrielles visées

Accès : Il s'agit d'offrir à l'abonné un accès à haut débit (de quelques dizaines de Mbit/s à 1 Gbit/s), les deux motivations principales étant les images animées et l'utilisation des écrans plats de large surface ; à terme, l'on peut penser aux applications vidéo 3D.

Transport : Les applications concernent le transport dans les réseaux dorsaux et métropolitains.

Marchés et entreprises concernés

Aussi bien pour l'accès que le transport, les entreprises concernées sont les opérateurs et les industriels produisant des systèmes, dispositifs et composants

Verrous scientifiques et technologiques

Accès :

Même s'il n'y a pas de verrous en termes de faisabilité technologique pour une première phase de déploiement, la R&D doit absolument permettre de réduire de manière drastique les coûts des composants et dispositifs destinés au terminal, en exploitant des techniques de production de masse (certains opérateurs US prévoient des plans de charge de plusieurs millions de lignes). Celles-ci pourraient s'apparenter aux techniques de l'industrie électronique du Silicium et doivent réussir le même saut en termes de prix de revient.

Il faut définir et mettre en œuvre une partie grandissante des fonctions 'réseaux' dans le domaine de l'optique, et réserver l'électronique aux tâches plus complexes uniquement en quelques points névralgiques du réseau.

Transport :

La capacité théorique ultime d'une fibre optique semble être de l'ordre de 50-150 Terabit/s. Même si les débits atteints en laboratoire sont supérieurs à ceux déployés commercialement, la question du choix du nombre de fibres pour assurer le passage du trafic reste ouverte sur le plan économique.

Outre la poursuite de ces travaux, parmi les axes de recherches à mener, il y a la réalisation de liaisons à 40 Gbit/s, et des fonctions adaptatives correspondantes (comme la compensation de dispersion) qui semblent indispensables à ce débit.

La transparence optique, bien loin du simple argument du réseau 'tout optique', doit être étudiée pour ses conséquences économiques fortes, avec la diminution du nombre d'éléments dans le réseau.

Une règle générale pourrait être de placer un maximum de fonctions 'réseaux' dans la technologie du transport

Recommandations

La position de la France et de l'Europe dans le domaine, forte il y a peu, est affaiblie aujourd'hui par le contexte économique : il faut absolument maintenir l'expertise existante et ne pas sortir de ce domaine.

Les laboratoires universitaires ont des difficultés à obtenir les budgets de fonctionnement nécessaires, à l'exception de quelques rares cas (plateforme à Lannion, IRSICA à Lille)

Il est important aussi de noter que les start-ups ont une activité industrielle, mais ne peuvent créer de la recherche

Orientations futures

Accès :

Les nouveaux services, en particulier ceux liés aux applications vidéo, sont et seront largement déployés. Les technologies 'sur cuivre' sont exploitables en particulier grâce aux techniques de compression. De même que les capacités de traitement des processeurs sont effectivement exploitées, les capacités Gigabit/s de l'accès seront consommées par les applications, même si celles-ci ne sont pas entièrement identifiées aujourd'hui.

Cependant, un changement de technologie sera rapidement (< 5 ans) nécessaire, via l'optique et la radio dans l'accès. La question se pose de placer l'intelligence du réseau en partie dans le domaine de l'optique (par exemple autour des longueurs d'onde) et celui de l'électronique.

La cryptographie quantique (qui commence à être proposée dans certains produits) et/ou les technologies du chaos optique pourraient trouver un débouché, en particulier concernant les questions importantes de sécurité et de confidentialité (par exemple, le domaine bancaire).

Une piste novatrice serait de trouver la technologie qui permettrait d'intégrer les fonctions d'émission/réception au sein d'un même dispositif (par exemple à travers des miroirs, ou en jouant sur des états de polarisation, toujours pour réduire les coûts)

Transport :

Les travaux sur la transmission optique au débit de 160 Gbit/s par canal doivent être maintenus, non comme une phase de développement, mais comme un déclencheur d'activités de recherches sur les composants, fibres, etc...

Aujourd'hui, toutes les activités sont centrées autour de la fibre optique et de la filière WDM. La fibre à très faible atténuation (0,01 dB/km), considérée dans les années 80 comme une rupture possible mais qui ne s'est pas concrétisée, pourrait redevenir un des sujets forts du domaine, avec à la clé, en cas de succès, un bouleversement en matière d'architecture de réseaux de transport.

Positionnement de la France

Certains opérateurs internationaux ont une activité forte de déploiement de l'optique dans le réseau d'accès : le Japon, Corée, Italie, Suède, les USA. Le Japon reste le seul pays à maintenir une réelle recherche d'envergure sur les composants optiques

Le contexte actuel nous fait assister à un réel retournement de situation, et les technologies du domaine ne sont plus un point fort en France ni en Europe. Les grands composants n'ont plus les supports massifs apportés dans un premier temps par les programmes nationaux, et par les industriels par la suite.

La France comporte des laboratoires de haut niveau se penchant sur les questions 'fondamentales', mais les activités de l'industrie et de l'opérateur se sont fortement réduites. En particulier, il y a un manque entre les parties purement recherche et industrialisation, suite à la disparition de la contribution de certains laboratoires (en particulier de FT-CNET) et à l'effondrement de la recherche industrielle entraînée par l'explosion de la "bulle optique".

Formations

La plupart des promotions 'télécoms' des Ecoles ne sont plus remplies (comme les filières scientifiques de façon générale). Il faut éviter que ces Ecoles/Universités ne se limitent qu'aux perspectives à court terme et ne ré-orientent trop rapidement leurs programmes en suivant les fluctuations du marché. Il en résulterait une diminution du nombre d'experts qui ne permettrait pas de repartir rapidement lorsque l'industrie des télécoms l'exigera. Il y a un risque de baisse des forces potentielles dans les 5-10 années à venir.

Il faut passer le message fort que l'industrie des télécommunications reste une industrie pertinente ; il faut considérer que le secteur est aujourd'hui sur un plateau momentané dans une logique de croissance.

2 Expert : Gilles Pauliat, Pierre Chavel, IOTA, Orsay

Propos recueillis par CM/JPH

Thèmes de recherche et développement

Le stockage optique de surface, de type CDs et DVDs, continue d'évoluer avec la réduction constante de la longueur d'onde. Le format "Blu-ray Disc" permet de stocker actuellement environ 30 GOctets sur une seule couche (en 50 sur 2 couches de la même face) d'un disque de 12 cm de diamètre avec un laser à 405 nm. La diminution de la longueur d'onde en dessous de 400 nm doit encore mener à un accroissement des capacités. Par contre cette technologie ne semble pas pouvoir permettre d'atteindre des capacités de l'ordre du TeraOctets.

Actuellement il ne semble pas y avoir de technologie qui se détache des autres pour atteindre des capacités de l'ordre du TeraOctet sur un disque optique de 12 cm de diamètre : le stockage en surface utilisant le champ proche, les techniques de volume holographique et point à point restent toutes trois potentiellement intéressantes

Applications industrielles visées

Disques optiques de capacité de l'ordre du TeraOctet :

- Marché grand public par exemple pour la constitution de bibliothèques vidéo personnelles.
- Marché professionnel : production cinématographique numérique.

Marchés et entreprises concernés

- Thomson (bien que la partie "disque optique" soit en Allemagne),
- Moulages Plastiques de l'Ouest (MPO).

Positionnement de la France

Moulage Plastique de l'Ouest possède un laboratoire de recherche commun avec le LETI pour des améliorations de leurs produits CDs et DVDs. Les recherches sur le stockage optique ne sont pas fédérées en France bien que plusieurs laboratoires travaillent sur ce sujet (stockage volumétrique holographique et point à point principalement). Sur ces systèmes innovants, il n'existe pas à ma connaissance de contacts étroits recherche-industrie (en particulier avec Thomson et MPO). Néanmoins, au niveau de ces laboratoires, des approches très originales ont été proposées : dispositifs de lecture par OCT des mémoires de volume point à point, inscription de ces mémoires de volume point à point par les techniques optiques paramétriques (création de multipôles), mémoires holographiques microfibrées...

En France, ces recherches restent encore confinées dans les laboratoires alors qu'ailleurs, et en particulier aux États-Unis des démonstrateurs (jusqu'à des lecteurs de disques optiques) ont été construits et des supports d'enregistrement sont proposés à la vente.

La compatibilité de ces lecteurs avec les formats existants est un fort handicap. Il en est de même de l'absence actuelle de support d'enregistrement réinscriptible.

Formations

5.1 Afficheurs de petits et moyens formats

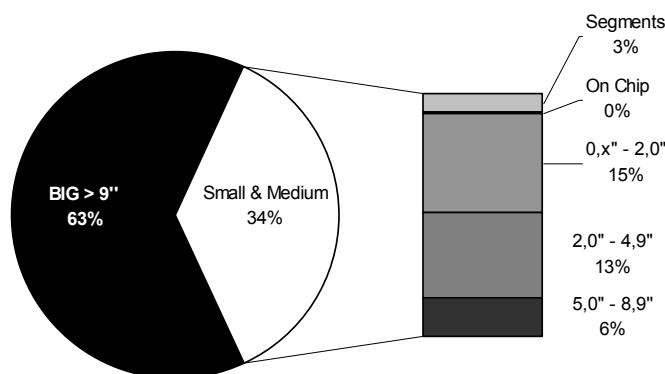
*Cécile JOUBERT – Amaury LE JEMTEL
NEMOPTIC*

5.1.1 Le marché global des écrans

Le marché global de l’affichage a atteint \$57 milliards en 2002 et devrait atteindre près de \$92 milliards d’ici 2006¹. Le marché se décompose entre les écrans à tube cathodique et les écrans plats, qui ont maintenant pris la tête avec plus de 50% de part de marché (\$30.4 milliards). Les écrans plats atteindront 71% de part de marché en 2006 avec un chiffre d’affaires autour de \$65 milliards, soit une croissance annuelle moyenne de 18%, tirée principalement par la forte croissance des segments PC portables, moniteurs et « grand public ».

5.1.2 La segmentation du marché par taille

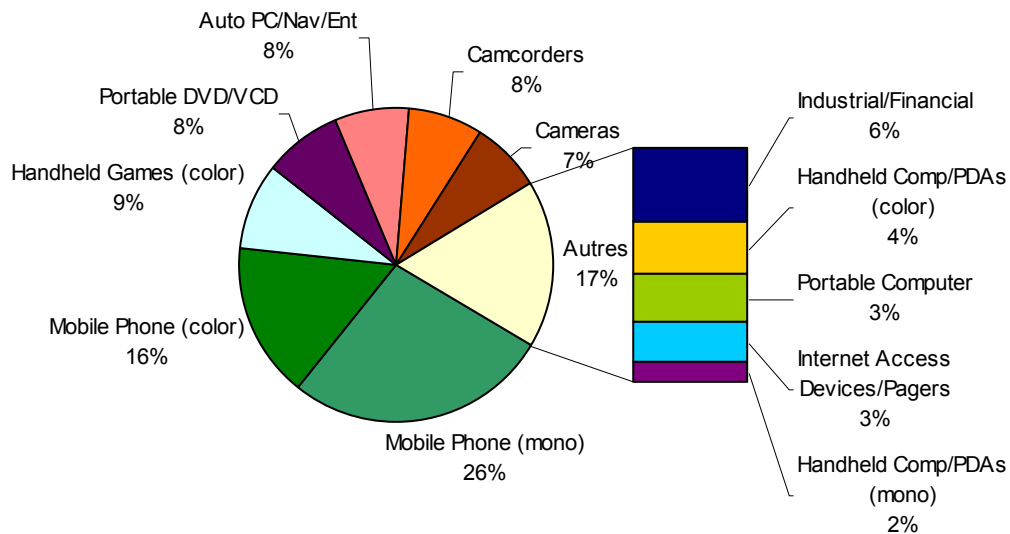
Le marché des LCD est clairement dominé en valeur par les écrans de grande taille. En revanche, en unités, le ratio est inverse, les écrans de moins de 9’’ représentent 97% des écrans livrés soit environ 2.4 milliards d’écrans contre 67 millions.



Segmentation du marché des LCD en valeur par la diagonale des écrans

¹ Source: DisplaySearch Q1'03

5.1.3 Les principales applications des écrans de petits et moyens formats



Segmentation du marché des écrans de petits et moyens format par applications

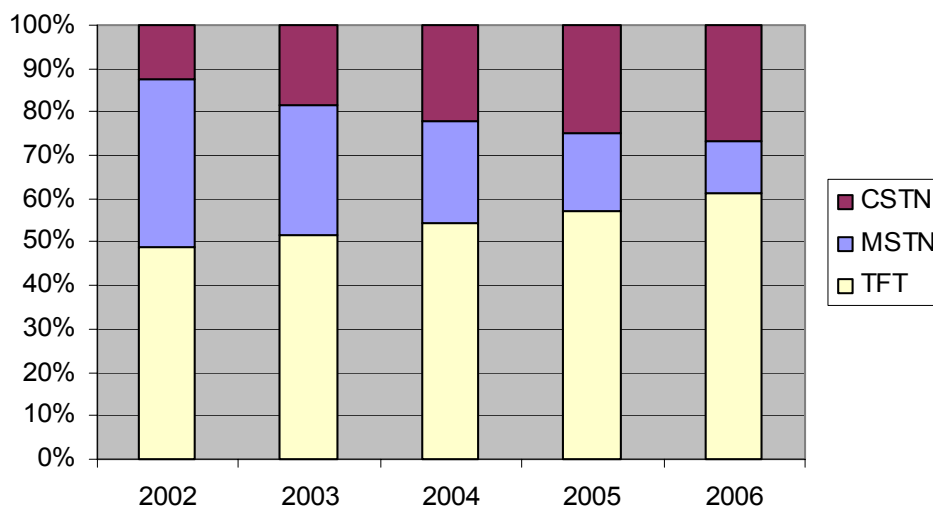
Les afficheurs pour téléphonie mobile représentent à eux seuls plus de 42% de cette catégorie d'écrans. Plusieurs autres applications, essentiellement grand public (jeux, lecteur DVD, appareils photos et caméscopes) et automobile, se situent autour de 7 à 10% de part de marché chacune.

5.1.4 La technologie mature pour les afficheurs : les cristaux liquides

La technologie à cristaux liquide est la seule technologie utilisée dans les écrans de petit et moyen format. Elle se subdivise en deux catégories, suivant que le mode d'adressage électronique de ces écrans est de type passif ou actif.

L'adressage, de type matriciel, est passif lorsque le signal électrique est véhiculé jusqu'au pixel par une bande d'électrode conductrice en ITO. On parle alors de multiplexage simple. Le mode cristal liquide est soit TN (Twisted Nematic) soit STN (Super Twisted Nematic). Le TN est cantonné aux applications simples de type segments, le STN est dominant pour les écrans monochromes (MSTN) destinés aux appareils d'entrée de gamme à faible multiplexage et pénètre de plus en plus les segments moyenne gamme (PDA et mobiles avec écran couleur, ou CSTN). Les technologies passives sont donc particulièrement adaptées aux applications à faible contenu, où coût et autonomie sont des facteurs prépondérants.

Un LCD à adressage actif comporte un transistor (ou TFT pour Thin Film Transistor) par pixel pour maintenir le signal électrique aux bornes de ce pixel. Grâce à ce transistor, le nombre de lignes adressables et la cadence de rafraîchissement de l'image sont augmentés. Les écrans à matrice active sont, de ce fait, utilisés dans les applications à contenu élevé (écrans pour ordinateurs portables, moniteurs), et à haute fréquence image (télévisions). Le marché des écrans à TFT a atteint \$22 milliards en 2002, dont plus des deux tiers pour les moniteurs et ordinateurs portables. Mais on assiste à une très forte demande d'écrans couleur pour le marché de la téléphonie mobile et du PDA. Néanmoins, la performance a un coût et dans le cas d'un écran pour téléphone mobile, un écran TFT couleur vaut aujourd'hui \$26 là où un écran CSTN similaire vaut \$15, soit une prime de 75%.



Part de marché relative par technologie cristal liquide

Pour les écrans de petit et moyen format, l'analyse des parts de marché relatives entre passif (MSTN et CSTN) et actif (TFT) confirme la chute des technologies monochromes passives face à la pression de la couleur. Celle-ci gagne du terrain avec les écrans TFT mais aussi avec les écrans CSTN, principalement sur le marché des mobiles, qui capteront une bonne partie de la croissance. En effet, de récentes innovations technologiques ont donné un sursaut de compétitivité aux écrans CSTN face aux écrans TFT uniquement sur le marché de la téléphonie.

5.1.5 Les technologies émergentes

La technologie émergente qui suscite le plus d'intérêt actuellement, tant au niveau de la R&D que de l'industrialisation, est la technologie basée sur l'électroluminescence organique (OLED pour Organic Light Emitting Display). Les OLED sont de type émissif, à adressage passif ou actif comme les LCD et à base de petites molécules ou de polymères. De nombreux prototypes OLED de taille comprise entre 2'' et 20'' sont montrés dans les expositions spécialisées, mais à ce jour la production de masse n'a pas démarré.

Les analystes les plus optimistes concèdent que les écrans OLED pourraient gagner quelques parts de marché en téléphonie sur les écrans LCD, à condition de survivre aux contraintes d'environnement inhérentes à l'application et d'atteindre le prix des LCD TFT. Au mieux les OLED prendront une part de marché de quelques pour cents des écrans de petites dimensions à l'horizon 2006.

D'autres technologies cherchent à se positionner sur de nouvelles applications des écrans, par exemple l'application e-book (livre électronique) où le critère consommation interdit l'utilisation des LCDs classiques.

Sur ce créneau, NEMOPTIC, start-up française, développe une technologie LCD bistable (l'image reste inscrite lorsque l'on coupe l'alimentation) appelée BiNem. Le licencié taiwanais de NEMOPTIC est actuellement en production pour le marché des e-book Chinois.

E-ink, start-up américaine, développe une technologie basée sur l'électrophorèse. Il s'agit de faire se déplacer des particules chargées et encapsulées à l'aide d'un champ électrique, ce déplacement permettant un changement local de couleur. C'est le concept « d'encre électronique ».

5.2 Visualisations avioniques

Frédéric DELAUZUN
Thales Avionic

5.2.1 Historique

Les tableaux de bords d'aéronefs ont évolué vers l'augmentation des fonctions présentées et donc une complexité supérieure.

La technologie a permis l'intégration de ces fonctions pour répondre aux besoins des nouvelles missions, faciliter la tâche de l'équipage, et réduire les coûts.

Bien loin des cockpits aux multiples cadrans, chacun répondant à un type d'information élémentaire, les cockpits modernes présentent un ensemble cohérents d'écrans capable de présenter toutes les informations de pilotage, navigation, gestion des systèmes avions ou d'armes pour les applications militaires.

5.2.2 Etat de l'art

En règle générale, la technologie LCD à matrice active domine le monde des cockpits modernes. La technologie CRT, qui avait révolutionnée les cockpits en remplaçant les visualisations électromécaniques, est trop gourmande en volume, quand il s'agit de réaliser des écrans de bonne taille, et surtout a une durée de vie limitée (usure des phosphores et Très Haute Tension). Cependant certaines applications sont réalisées grâce aux CRTs.

Nous pouvons distinguer trois types de visualisations :

- ## Les visualisations Têtes Basses (VTB) : Au cœur du cockpit, elles permettent de présenter les informations de pilotages (Horizons, altitude, vitesses...), les informations de navigations (plan de vol, way-point, image radar, cartographie...) et enfin les informations systèmes (moteurs, information de pannes, alarmes).
- ## Les Visualisations Têtes Hautes (VTH) : Ce type de visualisation a longtemps été l'apanage des applications militaires. Cependant nous assistons à un développement rapide des VTH dans l'avionique commerciale. Ces visualisations permettent de présenter au pilote une image en superposition au monde extérieur. Le pilote peut tout à la fois surveiller l'environnement extérieur (piste d'atterrissage, collisions...) et accéder aux informations importantes qui lui permettent d'assurer ses tâches de pilotage. Le deuxième intérêt de ce type de présentation de l'information tient de la capacité à présenter des informations conformes au paysage extérieur. Ces dernières, tel le vecteur vitesse, permettent une lecture intuitive de l'information.

- ## Les visualisations Viseurs de Casques (VC) sont encore réservées aux applications militaires ou de sécurité (police). Il s'agit de présenter les informations devant l'œil du pilote. Si ce dernier se déplace, tourne la tête, l'image suit le mouvement. Ce type de visualisation a le double intérêt de toujours montrer l'information au pilote et de présenter naturellement des informations centrées par rapport à lui. A titre d'exemple, la présentation d'images de nuit au niveau du casque permet une appréhension de la situation dans l'ensemble de l'espace (balayage de la tête) mais aussi permet au pilote de se retrouver dans l'image, en remplaçant la perception naturelle des yeux de jour.

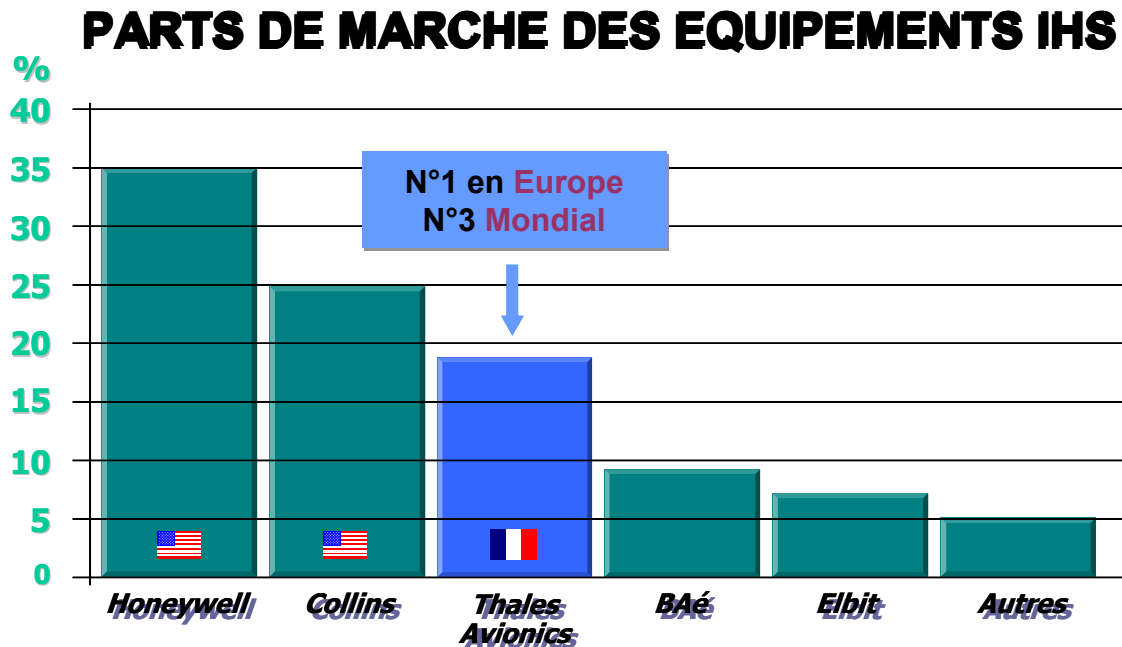
Les technologies utilisées dépendent du type d'équipement :

- ## Les visualisations têtes basses sont fondées sur la technologie LCD à matrice active. Les tailles d'écran varient du pouce de diagonale jusqu'à 14 voire 15 pouces. La résolution moyenne est de l'ordre de 200 microns. Ces écrans se caractérisent par des contraintes de lisibilité sous fort éclairement très élevée (Contraste de 3 minimum sous 100 000 lux). L'obtention de ces performances nécessite à la fois une réflectivité faible (spéculaire et diffuse), un bon contraste de base et une capacité de forte luminance. La colorimétrie est aussi très importante du fait de l'utilisation du code couleur pour la transmission d'information (rouge danger, ambre alarme....).
- ## Les visualisations têtes hautes, jusqu'à ces dernières années utilisaient des tubes à rayons cathodiques. Aujourd'hui il semble que la technologie LCD soit en train de remplacer le CRT. Le LCD permet la présentation d'image numérique, donc de très bonne qualité d'image. De plus les progrès réalisés en matière d'éclairage et de transmission des cellules LCD permettent d'obtenir des luminances graphiques au moins aussi forte que celles obtenues avec du CRT. Au niveau de la vidéo les gains sont encore plus spectaculaires avec une luminance 2 à 3 fois supérieure et une qualité d'image incomparable. Aujourd'hui les écrans proposées sont monochromes (autrement dit transparents, la couleur étant définie par les lampes). Leur résolution est du type SXGA.
- ## Le viseur de casque est la seule visualisation qui utilise encore la technologie CRT. Cette visualisation étant portée sur la tête, les contraintes de masse et de volume sont incontournables. Aussi les types de CRTs utilisés sont très réduits (de 0,5 à 1 pouce). Ces afficheurs doivent permettre une lisibilité sous fort éclairement. Suivant les applications, les luminances requises peuvent être de l'ordre de 10 000 cd/m². Le couplage à des intensificateurs de lumière, nécessité par certaines applications est une autre contrainte en faveur de l'approche CRT. Cependant, Kaiser propose pour le Comanche un casque à base de LCOS (Kopin) éclairé par un groupe de LEDs.

Enfin, comme pour toute application avionique, les contraintes d'environnement sont très sévères (gamme de température générique de -55°C + 125°C dans le domaine militaire, -40°C + 85°C dans le domaine civil – valeur adaptée au niveau des visualisations pour tenir compte de la température d'ambiance cockpit). Les autres contraintes chocs, vibrations, interférences électro-magnétiques, ...sont tout aussi importantes.

Un dernier point fondamental concerne les coûts avec en particulier les coûts de maintenance : un avion se doit de fonctionner pour une durée allant bien au delà de 20 ans.

La France est l'un des acteurs mondiaux majeurs de ce secteur industriel. Elle a pu atteindre cette position en anticipant les évolutions technologiques qui ont eu lieu durant la dernière décennie, en particulier en investissant dans la filière LCD, avec son usine de production de Moirans.



Positionnement des acteurs mondiaux du secteur des équipements d'interface « homme – système » (IHS)

5.2.3 Les évolutions probables

Les évolutions des équipements dans le secteur avionique resteront largement dépendantes de celles que l'on peut pressentir dans le domaine Grand Public. Dans ce contexte, pour chacune des technologies candidates, le bilan suivant peut être dressé :

La technologie LCD est aujourd'hui mature. Les entreprises Coréennes et Taiwanaises dominent la production. En dehors de Sharp, les fabricants Japonais s'orientent vers les nouvelles technologies ou des marchés de niches.

- ⌘ Une nouvelle technologie est en vogue, les OLEDs (Organic Light Emitting Diodes). Les écrans de téléphone portable, voire de Palm, sont la cible de base de cette technologie. Mais la lutte avec le LCD devrait être féroce. Cette technologie est très prometteuse, efficace, capable de niveaux de gris, couleurs plus saturées que le LCD, drivers faible tension, émissive. A ce jour, elle présente deux inconvénients majeurs : sa durée de vie (en particulier pour le bleu), et la nécessité de réaliser des transistors de commande à forte mobilité d'électrons à cause du caractère émissif de cette technologie.
- ⌘ Au niveau de la projection, les imageurs de type micro-miroirs (DMD) et LCD sur poly-silicium haute température (HPTS) dominent le marché. Les tentatives de la

technologie cristal liquide sur silicium (LCOS) pour percer le marché sont jusqu'à ce jour infructueuses.

- ## Du côté Plasma, cette technologie est en compétition avec le LCD et la rétro-projection pour le marché des très grands écrans de télévision mais n'a pas la capacité d'adresser le marché des cockpits avioniques.

La technologie Field Emission Display (FED) est revenue à l'étude dans les laboratoires, avec des avancées dans le domaine des nanotubes qui sont intéressantes (Samsung). A priori, il ne semble pas possible pour le FEDs de concurrencer les autres technologies pour les cockpits d'avions. Par contre cette technologie pourrait permettre de réaliser des afficheurs pour passagers à des coûts intéressants.

Les prochaines évolutions visibles pour le secteur avionique sont les suivantes :

- ## En ce qui concerne les Visualisations Têtes Basses, la tendance à l'augmentation de la taille des écrans se poursuit. Par contre la certification de cockpits avec un nombre réduit d'écrans est une contrainte nouvelle qui freine considérablement cette évolution. En terme de technologie, seule les OLEDs pourraient concurrencer le LCD dans un horizon d'une dizaine d'années. Cependant cette évolution est loin d'être inéluctable. Si cette technologie devait pénétrer le marché avionique, cela débiterait par des écrans modestes, soit des afficheurs dédiés, soit des visualisations d'instruments de plus petites tailles de type 3 ATI. De manière générale, les instruments constituent un axe porteur d'évolution technologique, que ce soit pour la technologie OLED ou les évolutions de la technologie LCD (transflectif et/ou séquentiel couleur). Au niveau des écrans principaux de pilotage, si à long terme les OLEDs ou l'utilisation des techniques « séquentiel couleur » peuvent présenter de l'intérêt, à court ou moyen terme les technologies LCD pour la TV grand public semblent intéressantes (en particulier en mode Vertically Aligned). Cette dernière (de type normally black) présente un angle de vue identique verticalement et horizontalement, qui permet une installation économique. D'autre part cette technologie peut permettre la conception de visualisation « fail-safe » qui est à la clé des cockpits grands écrans de demain.
- ## En ce qui concerne les Visualisations Têtes Hautes, le LCD devrait poursuivre son développement. La situation concurrentielle (avec deux compétiteurs mondiaux) peut favoriser le maintien des technologies de projection (DMD ou HTPS) en concurrence des valves LCD classiques, bien que ces dernières soient mieux adaptées.
- ## Pour le Visuel de Casque, il s'agit du domaine qui est de loin le plus ouvert. Le CRT devrait pouvoir se maintenir sur les casques intégrant un intensificateur de lumière de haute qualité (donc optique) et afficheur. Pour les autres casques, les technologies de projection et en particulier LCOS (transmissif plutôt que réflectif) ou HTPS sont les meilleures candidates.

5.3 L'électroluminescence organique

*Pierre LEBARNY
Thales Research & Technology*

5.3.1 Généralités

Les premières études de l'électroluminescence (EL) dans les matériaux organiques datent du début des années 1960. A cette époque, on s'intéressait essentiellement à des monocouches épaisses (de 10 μm à 10 mm) de monocristaux de composés aromatiques. De bons rendements quantiques avaient ainsi été obtenus mais sous des tensions élevées (supérieures à 100 V), ce qui conduisait à des rendements énergétiques très faibles. De plus, les électrodes utilisées alors étaient instables et les monocouches avaient tendance à recristalliser dans le temps, ce qui conduisait à une dégradation des performances du matériau. Ces travaux pionniers n'ont jamais conduit à des dispositifs d'affichage. Néanmoins, ils ont permis d'identifier et de comprendre la plupart des processus mis en jeu dans l'électroluminescence des matériaux organiques, à savoir la double injection de trous et d'électrons, le transport des porteurs de signes opposés, la recombinaison et l'émission.

Un regain d'intérêt pour le sujet apparaît en 1987 lorsque Tang et Van Slyke d'Eastman-Kodak démontrent qu'en équilibrant les densités de courant d'électrons et de trous dans une structure bi couche mince ($\approx 100\text{nm}$), il est possible d'obtenir une émission intense de lumière sous une faible tension. Une nouvelle étape décisive est franchie lorsqu'en 1990, des chercheurs de l'Université de Cambridge mettent en évidence le phénomène d'électroluminescence en étudiant le poly (para-phénylènevinylène) (PPV), un polymère π -conjugué. Cette découverte est à l'origine de la création en 1992 de Cambridge Display Technology (CDT). Aujourd'hui, CDT compte plus de 100 chercheurs qui ont pour vocation première de mettre au point la technologie de fabrication de dispositifs de visualisation essentiellement à base de polymères EL. La propriété intellectuelle dans le domaine des OLED² est partagée par Kodak pour les dispositifs à base de molécules évaporées et par CDT pour les dispositifs utilisant les polymères EL.

L'intérêt suscité par les matériaux électroluminescents organiques (molécules évaporées ou polymères) s'explique par la démonstration d'une combinaison de caractéristiques uniques qui présentent un intérêt évident en visualisation, à savoir :

² Le sigle OLED employé dans cet article désigne indistinctement les diodes électroluminescentes à base de molécules évaporées ou de polymères. Dans la littérature anglo-saxonne, la distinction est assez souvent faite et dans ce cas on réserve le sigle OLED pour les molécules évaporées et le sigle PLED pour les polymères

- un fonctionnement en mode émissif (pas besoin de rétroéclairage) sans réflexion spéculaire,
- un dispositif tout solide,
- une grande brillance (plusieurs dizaines de milliers de cd/m^2),
- un bon contraste sous éclairage,
- une faible tension de fonctionnement ($<5\text{V}$),
- un grand angle de vue (émission lambertienne),
- une émission possible dans tout le domaine du visible (par modification de la structure chimique du matériau),
- un temps de réponse très court (du domaine de la μs),
- une capacité à faire de très petits pixels liée à la faible épaisseur du matériau actif ($\sim 100\text{nm}$),
- un accès possible aux écrans souples donc conformables, très minces ($<0,2\text{mm}$) et légers.

Cependant, les premières réalisations d'écrans électroluminescents organiques (OLEDs) n'ont pu voir le jour que lorsque l'amélioration des matériaux, de l'architecture des dispositifs et du process, a permis d'atteindre des durées de vie supérieures à 10 000 heures pour une luminance de 100 cd/m^2 . Les premiers afficheurs EL organiques (destinés aux autoradios) ont été commercialisés au Japon par Pioneer en septembre 1997.

5.3.2 Etat de l'art mondial

Même si le chiffre d'affaire reste encore modeste, l'industrie des OLEDs a aujourd'hui une réalité, avec 20 millions d'écrans vendus en 2003, principalement pour des applications nomades. Des écrans électroluminescents organiques équipent ainsi certains auto radios de chez Pioneer et TDK. Philips a introduit un afficheur monochrome à base de polymère EL dans un de ses modèles de rasoir électrique. Certains téléphones mobiles Motorola possèdent un afficheur monochrome OLED. Des « microdisplays » pour applications professionnelles et militaires sont commercialisés par eMagin (molécules évaporées) et par MED (polymères). Enfin, au début de l'année 2003, SK Displays (société commune à Sanyo et à Kodak) a lancé la production d'écrans de 5,5 cm de diagonale à matrice active en silicium poly-cristallin. La production de 100 000 unités par mois cible dans un premier temps le marché des appareils photos numériques fabriqués par Kodak (modèle Easy share LS633). Cette production devrait passer à terme à 1 million d'unités.

Ces avancées n'ont été en partie possible que grâce à des sociétés spécialisées dans le dépôt de couches minces sous vide comme Ulvac, Aixtron, Tokki, Sunic... qui ont développé et commercialisé très rapidement des machines dédiées à la fabrication d'OLEDs à base de molécules de faible masse. Ces appareils sont conçus de telle manière que la purification ultime des différents matériaux utilisés, leur dépôt et l'encapsulation finale de l'écran sont réalisés in situ, sans remise à l'air, ce qui permet d'obtenir les durées de vie requises.

Les composés standards servant à faire les OLEDs à base de molécules évaporées sont commerciaux (Aldrich, Lancaster, Kodak, Syntec, H. W. Sands Corp....). Mais les nouvelles générations de composés ne sont vendues qu'à travers des accords préalables (Idemitsu Kosan). La situation des polymères est encore plus critique, puisque seules quelques sociétés comme Covion, Dow chemicals, American Dye Society, les synthétisent et ne les distribuent qu'à des sociétés ayant un réel projet industriel.

L'intérêt pour la technologie OLED ne fait que croître si on en juge par le nombre croissant de sociétés qui s'équipent pour produire des OLEDs d'ici à 2005. Parmi celles-ci, on peut citer UDC, Du Pont Displays, Osram, Samsung SDI, Toshiba, Optrex, Optotech, Novaled, RiTdisplay, Truly, IDTech-CMO-IBM.... Il faut également souligner la volonté des différents acteurs de créer les alliances pertinentes qui permettent de progresser rapidement.

L'évolution de la taille et de la définition des prototypes présentés dans les différents congrès est tout à fait remarquable. Le plus grand démonstrateur réalisé à ce jour, est celui de IDTech-CMO-IBM exposé au SID 2003. Cet écran de 20 pouces de diagonale a une définition WXGA (1280 x 768 pixels) avec une luminance de 300cd/m² et un adressage au moyen d'une matrice active en silicium amorphe.

5.3.3 La situation en France

Si la recherche académique française a contribué activement aux débuts de la compréhension des phénomènes physiques mis en jeu dans l'électroluminescence organique, elle n'a pas su reprendre le sujet à temps dans les années 90 pour être aujourd'hui en bonne place sur la scène internationale. Cette situation s'explique en partie par les investissements conséquents que nécessite le sujet (bâties d'évaporation multi creusets dédiés aux composés organiques, bâties d'évaporation de métaux très réducteurs comme le calcium, boîte à gants...). Parallèlement, très peu de laboratoires universitaires se sont alors impliqués dans la synthèse de polymères conjugués.

Aujourd'hui, un certain nombre de laboratoires commencent à être équipés correctement pour étudier la physique de l'électroluminescence organique, quelques laboratoires de chimie macromoléculaire ont une petite activité dans la synthèse des polyfluorènes et des dérivés de PPV. Mais les problèmes plus technologiques comme l'encapsulation et le dépôt des polymères par jet d'encre ne sont pas abordés.

La collaboration entre chimistes et physiciens est encore limitée. Néanmoins, un GDR intitulé « Composants Organiques pour l'Optoélectronique » (CO₂) s'est mis en place en janvier 2003 et a pour vocation entre autre de favoriser les échanges entre les différents laboratoires universitaires et les industriels impliqués dans le domaine des OLEDs.

Les durées de vie très courtes des premiers dispositifs avaient suscité un intérêt modéré des industriels français impliqués dans les écrans plats. Néanmoins dès 1993, le centre de recherche de Thales et le CEA/LIST s'engageaient dans une étude matériau afin d'évaluer le domaine. Aujourd'hui, Thales continue à entretenir une veille technologique active grâce à son centre de recherche et au travers de la « plate-forme électronique grande surface » créée en janvier 2003. La plate-forme électronique grande surface qui regroupe Thomson, Thales, Corning, et le CEA a pour vocation d'acquérir la maîtrise des matrices actives en silicium polycristallin et de mettre au point la technologie OLED à base de molécules évaporées. Enfin, Thomson et CDT viennent de signer un accord pour mener un programme de recherche et développement qui vise à évaluer les écrans OLEDs à matrice active à base de polymères EL.

5.3.4 Perspectives

L'amélioration des matériaux (plus grande pureté, emploi des composés phosphorescents), de l'architecture des dispositifs et du process, ont permis au cours de ces dernières années d'obtenir des OLEDs ayant des durées de vie compatibles avec un grand nombre d'applications. Néanmoins, les OLEDs rentrent directement en compétition avec les écrans à cristaux liquides qui ont également progressé en terme de taille et d'angle de vue. La concurrence est d'autant plus sévère que les fabricants d'écrans à cristaux liquides doivent amortir 20 ans de R&D ce qui les rend peu réceptifs à la technologie OLED, alors qu'une partie de leur équipement est compatible avec cette nouvelle technologie.

Cependant, un bilan énergétique en faveur des OLEDs comparé aux écrans LCD rétro éclairés doit leur ouvrir dans un avenir proche le marché des produits nomades. Par ailleurs, les polymères électroluminescents a priori compatibles avec des techniques de dépôt de type impression « roll to roll process » devraient permettre d'accéder à des écrans plats bas coût. Enfin, la mise au point de substrats souples imperméables à l'oxygène et à l'eau par la société américaine Vitex, ouvre la perspective d'obtenir des écrans extra minces conformables.

5.3.5 Recommandations

Il est encore prématuré d'anticiper la vraie place des OLEDs en visualisation. Cependant, la combinaison unique de leurs propriétés remarquables conduit raisonnablement à prévoir que les OLEDs auront leur place dans le marché des écrans plats. Selon les analystes, Display Search et Stanford Resources, le marché des OLED devrait atteindre les 3 billions de dollars d'ici à 2007.

Même si le retard pris en France dans le domaine semble important, il est certain qu'il y a encore un rôle à jouer dans certains aspects importants de la technologie qui ne sont pas figés comme l'architecture de la matrice active et l'augmentation du rendement externe des écrans (seulement 20% de la lumière émise par le matériau sont utilisés).

Enfin, Philips a reçu une commande de L-3 Communications Display Systems pour équiper dès 2005 les cockpits d'avions avec des OLEDs à base de polymères EL. En cas de succès de Philips, Thales Avionics serait directement concerné et devrait être capable de répondre à cette mutation.

Pour toutes ces raisons, il est indispensable qu'une activité de recherche et de veille technologique sur les OLEDs soit soutenue au niveau national.

5.4 L'OLED, en route vers l'industrialisation

Eric MARCELLIN-DIBON
Thomson

L'intérêt suscité par les matériaux électroluminescents organiques OLED/PLED (molécules évaporées ou polymères) s'explique par la combinaison de caractéristiques qui présentent un intérêt évident en visualisation.³

Bien que tous les problèmes techniques liés à cette technologie ne soient pas encore complètement résolus, certaines sociétés sont rentrées dans un mode de production, en ciblant principalement les applications téléphone portable et autoradio, qui sont moins sévères au niveau des spécifications. C'est le cas de Pioneer, qui est leader sur le marché, de Sanyo-Kodak Display, de RiTdisplay Corporation, de TDK et de Samsung-NEC Mobile. Jusqu'à ce jour, il s'agit principalement d'écrans OLED à matrice passive sauf pour le 2,1'' de l'appareil photo numérique de Sanyo-Kodak. D'autres acteurs se préparent activement à lancer des écrans OLED à matrice active (Sony, Samsung, AUO, CMO ...) et le marché OLED va fortement croître de 2004 à 2007 pour atteindre trois milliards de USD en 2007.

Si le marché OLED se développera dans un premier temps sur le segment des petits écrans portables, le second segment, qui devrait se développer à partir de 2007, est celui des écrans de 20 à 30'' pour application télévision. Dans ce cadre, il reste de nombreux axes de recherches très importants à approfondir tels que :

- développement des matériaux à haute efficacité,
- procédés de fabrication industrielle adaptés aux grandes tailles d'écrans (shadow mask, ink-jet-printing ...),
- adaptation de la technologie OLED aux matrices actives à base de silicium amorphe,
- encapsulation pour grande taille d'écrans.

C'est pour cette raison, que la recherche sur les technologies OLED/PLED s'est très fortement intensifiée dans les derniers mois.

De nombreux pays soutiennent activement des programmes de recherches, tels que le Japon, Taiwan, la Corée, les Etats-Unis mais aussi l'Allemagne, et certains pays asiatiques s'engagent dès à présent dans des programmes d'investissements industriels. On peut citer au niveau recherche le programme soutenu par le ministère allemand, OLEDFAB, regroupant

³ Voir rapport détaillé de P. Lebarny sur « l'électroluminescence organique » du Tome II

Novaled, Applied Films, Fraunhofer, Thomson, et les universités de Dresde et de Stuttgart, dont le but est de développer toutes les briques technologiques ainsi que l'équipement industriel pour des écrans OLED à haute efficacité.

D'autre part, Thales, Thomson, Corning et le CEA ont décidé d'unir leurs efforts au travers de moyens mis en commun sur la « plate-forme électronique grande surface » PEGS, créée en janvier 2003, avec entre autre vocation la mise au point de la technologie OLED à base de molécules évaporées. Enfin, Thomson et CDT viennent de signer un accord pour mener un programme de recherche et développement qui vise à évaluer les écrans OLEDs à matrice active à base de polymères EL.

Un des points clé, pour le développement des écrans OLED est leur adaptation aux matrices actives, utilisées dans les écrans LCD. Cette technologie, liée à la fabrication des LCD, est principalement contrôlée au niveau industriel par les fabricants de LCD coréens, taiwanais et japonais. Pour cette raison, l'effort de recherche est fortement soutenu dans de nombreux pays absents de la technologie LCD, tels que les Etats-Unis, l'Allemagne, ou la Chine pour contrebalancer la position dominante de la Corée et de Taiwan.

Devant l'accélération de la recherche et des investissements il paraît judicieux et essentiel de :

- *Soutenir tout axe de recherche qui permettra d'améliorer l'efficacité en puissance des écrans OLED. Le principal avantage de cette technologie est la faible consommation par rapport aux écrans LCD.*
- *Soutenir tout axe de recherche qui permettrait d'accélérer l'extension de cette technologie vers les grandes tailles. Cette technologie étant parfaitement adaptée aux spécifications nécessaires pour application télévision.*
- *Soutenir le transfert technologique et l'investissement industriel sur les écrans OLED, de façon à pérenniser le développement de la propriété intellectuelle dans ce domaine.*

5.5 Traitement optique de l'image

*Pierre AMBS
ESSAIM Mulhouse*

5.5.1.Introduction

Les bases du traitement optique de l'image ont été établies par les travaux de Maréchal et de Duffieux autour des années 1950. C'est un peu plus tard que sont apparues les deux principales architectures utilisées pour le traitement optique de l'image. VanderLugt en 1964 a proposé un montage holographique basé sur un filtrage spatial. Ainsi l'architecture dite "double diffraction" ou "4-f" est largement utilisée pour les corrélateurs optiques et est basée sur le filtrage spatial. En 1966 une autre architecture de corrélateur optique, le corrélateur à transformée conjointe, a été proposée par Weaver et Goodman. Les avantages de l'optique pour ces processeurs sont le traitement parallèle de l'image et la vitesse du traitement, grâce aux propriétés de transformée de Fourier d'une lentille en lumière cohérente, qui permettent de réaliser des opérations complexes telles que les corrélations d'images à la vitesse de la lumière. Cependant les performances de ces processeurs sont longtemps restées théoriques car l'absence de certains composants électro-optiques comme des modulateurs spatiaux de lumière performants et fiables a empêché tout développement des processeurs optiques pour le traitement de l'image jusque dans les années 1980. Il faut noter que bien que des modulateurs spatiaux de lumière aient été développés pour une utilisation dans des processeurs optiques, c'est le développement de modulateurs pour des applications comme les vidéo projecteurs qui a permis les travaux de recherches très nombreux sur les processeurs optiques de reconnaissance de formes au cours des 15 dernières années.

5.5.2. Evolution durant les 15 dernières années

Cette période a vu un essor sans précédent des processeurs optiques pour le traitement d'images, comme le montrent les très nombreux résultats scientifiques dans le domaine. Ce développement a été intimement lié durant ces années au développement des modulateurs de lumière. Ainsi certains processeurs conçus vers 1985 ont utilisé des petites télévisions portables à écran à cristal liquide malgré leurs nombreux défauts, puis au début des années 90 de nombreux processeurs ont été basés sur des modulateurs de lumière à cristaux liquides nématiques provenant de vidéo projecteurs. Maintenant les processeurs les plus performants utilisent des modulateurs de lumière à cristaux liquides ferro-électriques.

De très nombreuses conférences ont eu lieu avec pour thème le "calcul optique" (Optical Computing ou bien Optical Information Processing).

Certaines de ces conférences existent toujours telles que Optical Computing (OC) organisée une année aux USA et l'autre année dans un autre pays. La SPIE organise en plus de conférences thématiques, deux conférences régulières par an, l'une dans le cadre la conférence

AeroSense "Optical Pattern Recognition (D. Casasent)" l'autre dans le cadre sa conférence annuelle "Algorithms and Systems for Optical Information Processing" (B. Javidi, D. Psaltis) rebaptisée en 2003 "Optical Information Systems" afin de bien refléter l'évolution du domaine.

Certaines conférences telles que "Optical Computing OC" incluent les processeurs optiques numériques, les interconnexions optiques et les processeurs optiques analogiques comme les corrélateurs optiques pour la reconnaissance de formes qui sont présentés ici.

Des revues telles qu'Applied Optics, Optics Communications, JOSA A et Optical Engineering publient régulièrement des articles ayant trait à ce domaine de recherche. Plusieurs livres ont aussi été publiés.

De nombreux processeurs optiques de traitement d'image ont été développés dans le monde depuis 1985. Parmi les pays les plus actifs on peut citer les USA, la France, l'Espagne, le Royaume Unis, la Pologne, le Québec et la Suède. Il faudrait consacrer un livre tout entier à la description des différentes réalisations.

Il faut noter que les recherches ont été menées dans plusieurs directions:

- développement de nouveaux composants électro-optiques tels que des modulateurs spatiaux de lumière de plus en plus performants et adaptés, et des détecteurs.
- développement de nouveaux algorithmes et de filtres pour les processeurs de reconnaissance de forme.
- optimisation des architectures en particulier l'architecture du corrélateur à transformée conjointe.
- développement de nouvelles architectures: réseaux de neurones optiques, corrélateur avec disque optique, transformée par ondelettes, transformée optique de Hough, ...
- réalisation de corrélateurs optiques compacts.

En France, durant les 20 dernières années, presque tous les laboratoires en optique et traitement d'images ont mené à un moment ou à un autre des recherches dans le domaine du traitement optique de l'image ou du signal. Ce fut d'ailleurs aussi le cas à l'étranger. Devant le nombre très important de travaux, on se contentera d'en citer juste quelques-uns.

- Thomson LCR (actuellement Thales RT): très nombreux travaux touchant tous les aspects des processeurs optiques, réalisation d'un corrélateur optique compact.
- ENST Br.: réalisation d'un corrélateur optique embarqué pour la reconnaissance de panneaux routiers
- IOTA: processeurs optiques, réseaux de neurones optiques, mémoires optiques
- Institut Franco-Allemand de Saint Louis (ISL): analyse de particules par processeur optique.

Aux USA, de très nombreux travaux ont été menés sur les processeurs optiques en particulier pour des applications militaires. On peut citer quelques acteurs:

- Carnegie Mellon University (D. Casasent) : tous types de processeurs optiques
- CalTech (D. Psaltis) : corrélateur optique avec mémoire à accès parallèle
- UCSD (S.H. Lee, S. Esener, Y. Fainman): architecture, composants, processeurs,
- University of Connecticut (B. Javidi): étude du corrélateur joint, sécurité,
- Pennsylvania State University (F.T.S. Yu) : corrélateur optique

La DARPA avait lancé en 1992 un programme de 5 ans intitulé TOPS (Transitioning of Optical Processing into Systems) réunissant des laboratoires universitaires et des industriels.

Au Canada l'Université Laval de Québec (H. Arsenault) mène depuis l'origine des recherches très actives sur les corrélateurs optiques et sur les invariances.

En Espagne les Universités de Barcelone, Madrid et Valence sont aussi actives aussi bien au niveau réalisation de processeurs que du développement d'algorithmes.

En conclusion, après près de 20 ans de recherches, les processeurs optiques pour le traitement d'images ont atteint une certaine maturité et un point culminant en termes d'activité de recherche. Cependant, ils n'ont pas connu l'essor industriel espéré, la compétition avec les processeurs numériques étant très rude.

5.5.3. Situation actuelle

Actuellement le nombre de travaux consacrés uniquement au processeur optique de reconnaissance de formes a tendance à diminuer car les limitations face aux processeurs électroniques tant au niveau coût, flexibilité, encombrement ne sont pas encore résolues.

Divers processeurs optiques basés soit sur un corrélateur "4-f" ou un corrélateur à transformée conjointe ont été réalisés et ont fait l'objet de commercialisation. On peut citer les corrélateurs optiques fabriqués aux USA par Litton, Lockheed Martin, Sanders, BNS, Displaytech, et d'autres pays ACREO (Suède), INO (Canada). Cependant la diffusion de ces corrélateurs est restée relativement restreinte.

Un état des lieux sommaire et non-exhaustif permet les constations suivantes:

En France, les travaux actuels sur les corrélateurs optiques concernent notamment:

- l'ENST Br. : étude d'architectures et de filtres multicanaux.
- Institut Franco-Allemand de Saint Louis (ISL): processeur cohérent de poursuite de cible.
- Université Louis Pasteur Strasbourg: corrélateur optique pour le traitement d'images médicales.
- Université de Haute Alsace: contours actifs "snakes" par processeur optique incohérent.

Dans le reste de l'Europe, l'Espagne est particulièrement active dans le domaine dans les Universités de Barcelone et de Valence: reconnaissance d'objets 3-D, reconnaissance de couleurs

L'Université Laval de Québec reste encore très active dans le domaine avec des travaux récents sur l'invariance aux distorsions et la reconnaissance 3-D.

Aux USA, l'Université du Connecticut reste fortement impliquée dans le domaine avec notamment des applications pour la sécurité. D'autres laboratoires continuent à améliorer le corrélateur optique qu'ils ont développé, on peut citer ainsi le Jet Propulsion Lab.

Il est à noter que les applications concernant la sécurité sont un domaine où les processeurs optiques peuvent avoir un avantage décisif sur les processeurs électroniques. En effet lorsque la phase est utilisée pour le cryptage d'une image, cette phase ne peut être lue qu'optiquement.

De plus deux événements récents, la conférence "Optical Information Systems" dans le cadre de la conférence annuelle de la SPIE (San Diego août 2003) et un numéro spécial d'Applied Optics (10 août 2003), permettent aussi de faire le point sur l'état de la recherche dans le domaine.

La conférence "Optical Information Systems" présidée par B. Javidi et D. Psaltis a rassemblé 45 communications dans les sessions suivantes: l'imagerie tridimensionnelle, le cryptage et la sécurité, les techniques optiques pour la reconnaissance des formes, la corrélation et la mesure, les algorithmes pour les systèmes optiques et les matériaux et composants. Ces thématiques reflètent parfaitement les secteurs de recherche les plus actifs aujourd'hui.

Le numéro d'Applied Optics du 10 août 2003 intitulé "Optical Pattern Recognition" résume aussi très bien les tendances actuelles de la recherche selon trois axes: les algorithmes, les architectures et les applications. Les algorithmes présentés sont inspirés par l'optique, mais leur implantation peut être numérique ou hybride optique numérique. Ces algorithmes traitent de problèmes délicats comme les invariances à la rotation et à l'illumination. Ils illustrent bien le potentiel d'innovation qui existe encore au niveau des algorithmes et des filtres en

particulier grâce à l'utilisation de non-linéarités. Les architectures présentées sont basées sur des structures classiques, mais elles voient leur capacité augmenter par exemple par l'utilisation d'un balayage acousto-optique dans un corrélateur joint ou bien par l'implantation multicanaux de contours actifs dans un corrélateur incohérent. En conclusion, les éditeurs de ce numéro d'Applied Optics soulignent que l'implantation optique de tout algorithme et ou architecture peut bénéficier d'une combinaison appropriée de technologies numériques et optiques.

Il apparaît aussi que vu les progrès réalisés par les processeurs numériques électroniques, la cadence vidéo imposée par les modulateurs à cristaux liquides nématiques en hélice n'est plus suffisante. Il faudrait augmenter la cadence de plusieurs ordres de grandeur en utilisant des modulateurs plus rapides, les cristaux liquides ferro-électriques étant actuellement la technologie la plus mature pour cela. L'approche multicanaux permet aussi d'augmenter la capacité de calcul des processeurs de même que le couplage du corrélateur optique avec une mémoire optique à accès parallèle.

Cependant ce bilan un peu mitigé ne doit pas occulter les retombées importantes et positives des recherches sur les processeurs optiques menées au cours de la dernière décennie. Ces retombées ont concerné de nombreux domaines:

- les composants électro-optiques: progrès des modulateurs spatiaux de lumière, progrès et meilleure maîtrise des cristaux photoréfractifs, ...
- les algorithmes qui ont été développés dans le cadre de l'étude de processeurs optiques ont de nombreuses applications dans les processeurs numériques.
- les applications: de nouvelles applications basées sur les travaux concernant les processeurs optiques ont été développées, on peut citer les retombées dans le domaine de la sécurité qui est en pleine expansion et aussi le développement des nouveaux moyens d'imagerie (multispectrale, polarimétrique, ...)

5.5.4. Conclusions et perspectives

Le domaine de recherche consacré au traitement optique de l'image a considérablement évolué et gagné en maturité au cours des quinze dernières années, passant de montages expérimentaux à des processeurs optiques qui ont fait l'objet de commercialisation. Cependant ces processeurs n'ont pas eu la diffusion espérée. Les limitations sont aussi apparues clairement face aux processeurs électroniques qui effectuent maintenant certains traitements d'image à la cadence vidéo. Ces limitations concernent notamment le prix et aussi la difficulté de mise en œuvre. Mais il ne faut pas oublier que ces recherches sur le traitement optique de l'information ont permis des progrès importants et de multiples retombées positives dans des domaines tels que les composants électro-optiques, les algorithmes et les applications nouvelles.

Dans le futur, il s'agira de déterminer les applications susceptibles de bénéficier d'un apport de l'optique et de proposer de nouvelles architectures sûrement hybrides associant un traitement optique avec un traitement électronique. Les applications potentielles concernent le secteur biomédical, la défense, l'accès aux données multimédia et la sécurité pour n'en citer que quelques-unes. Les nouvelles architectures devraient renforcer le potentiel de ces processeurs, il s'agit par exemple des architectures multi-canal, et aussi de l'association d'une mémoire optique à accès parallèle avec un processeur optique. La mise au point récente par deux sociétés américaines de telles mémoires basées sur un disque optique holographique facilitera ce genre d'approche.

Il faut aussi noter que les limites du domaine de recherche consacré au traitement optique de l'image sont devenues beaucoup plus floues et qu'il est réducteur de se contenter du processeur optique de reconnaissance de forme. Il vaudrait mieux cerner tout le domaine en

parlant de traitement optique de l'information ou optique de l'information ("Information Optics") comme le fait le journal Applied Optics avec son numéro mensuel intitulé "Information Processing". Divers domaines prennent une importance croissante tels que les Eléments Optiques Diffractifs basés sur des microtechnologies ou nanotechnologies, les cristaux photoniques, ...

En conclusion le domaine de recherche du traitement optique de l'information reste un domaine de recherche très actif et bien identifié au niveau mondial, il convient donc d'y rester présent et de le développer, en particulier en élargissant les recherches aux domaines connexes afin de ne pas manquer les opportunités actuelles et futures dues en particulier aux progrès technologiques et aux développements de nouvelles applications.

5.6 Holographie

Basée sur des principes très largement étudiés dès les années 1950 et initialement ciblée vers des applications de microscopie, cette technique s'est longtemps cantonnée à des applications de types « artistiques » relatives à la présentation d'images tri-dimensionnelles.

Les analyses détaillées dans différents domaines connexes à l'holographie présentées ci-après mettent en évidence de récentes évolutions autour desquelles les auteurs ont pu dégager un certain nombre de recommandations :

Holographie image : *Jean Louis TRIBILLON (DGA/DSP/SREA)*

Matériaux holographiques : *Christiane CARRE MORLET-SAVARY (ENSC Mulhouse)*

Holographie numérique : *Pascal PICART (LAUM Le Mans)*

Les aspects concernant l'holographie temps réel ou couleur appliquée au contrôle non destructif n'est pas traité ici dans la mesure où il est détaillé dans le cadre des méthodes de contrôle du thème 7.

5.6.1 Holographie image (J.L. Tribillon)

5.6.1.1 Le contexte

L'holographie fut inventée, avec, en vue, une application particulière. Dans les années 1940, la résolution des microscopes électroniques était limitée, pour la qualité des lentilles électroniques, à environ 5 Angströms. C'est alors que Gabor⁴, en 1948, suggéra une méthode permettant d'aller au-delà de cette limitation dans un court papier intitulé "A new microscopic principle". Ce papier fut suivi plus tard d'une discussion détaillée. Gabor (1949) étendit les idées de Michelson, Bragg, Buerger, en raisonnant de la manière suivante : la phase de l'onde diffractée pouvait être déterminée en la comparant à une onde de référence standard. Pour ce faire, il additionnait à l'onde diffractée, une onde uniforme. Celle-ci voyait son amplitude modulée par l'onde diffractée sous condition que les deux soient cohérentes, l'une par rapport à l'autre.

L'enregistrement de l'onde diffractée modulée constitue ce que Gabor a appelé l'hologramme⁵. Une onde uniforme arrivant sur l'hologramme est diffractée par celui-ci, donnant la seconde diffraction, et réalisant ainsi la reconstruction du front d'onde original. L'image de l'objet original est ainsi créée. Cette image est la réplique exacte en volume de lumière de l'objet. C'est son moule optique.

La méthode est un procédé à deux étapes de formation d'image cohérente dans lequel, dans un premier temps, on enregistre l'hologramme et dans un second temps, en éclairant correctement l'hologramme on le restitue.

D'un point de vue purement holographie optique, d'autres efforts furent entrepris par Rogers (1952), El Sum et Kirkpatrick (1952), Baez (1952), Lohmann (1956). Mais l'imagerie obtenue

⁴ Dennis Gabor, Prix Nobel de Physique 1971

⁵ Hologramme = enregistrement intégral "... J'appelais "hologramme" ce schéma d'interférence du mot grec "holos" (le tout) parce qu'il contenait la totalité de l'information ...". D. Gabor.

était pauvre (phénomène de double image dans les hologrammes de Gabor, bruit du système à cause des poussières, problème de la non-linéarité du procédé d'enregistrement, ...). Toutes ces expériences sont faites en général avec des lampes à vapeur de mercure.

Il fallut attendre l'apparition des lasers au début des années 60 pour qu'à une apparente stagnation d'une dizaine d'années succède une étonnante décade d'expansion, caractérisée par la multiplication des chercheurs, des centres de recherches, des séminaires, des colloques⁶, et par le foisonnement des idées nouvelles. C'est à cette époque que furent définies dans leurs grandes lignes, toutes les ressources que pouvaient constituer les techniques de base de l'holographie.

5.6.1.2.Hologramme image

L'homme vit dans un environnement spatial à trois dimensions. Il ne faut donc pas s'étonner qu'il ait cherché des moyens permettant de le reproduire : effets de perspective, observation en lumière polarisée au moyen de lunettes spéciales, réseaux lenticulaires, ...

L'hologramme image, voie naturelle de l'holographie, permet le vrai relief. Il conserve toutes les données qui le caractérisent, à savoir : la profondeur de champ et la parallaxe. Ces deux paramètres existent simultanément dans un hologramme. Son observation laisse apparaître une image, copie conforme en volume de lumière de l'objet initial. En se déplaçant devant l'hologramme, le spectateur peut donc percevoir, non seulement les différentes perspectives de l'image, mais aussi les objets cachés par d'autres objets, ou dissimulés par un premier plan.

Les techniques de Fresnel fournissent les techniques de base à toute reproduction tridimensionnelle par l'holographie.

5.6.1.3.Les différents types d'hologrammes images sont les suivants :

Hologrammes transmission laser

Ce sont ces hologrammes qui ont été les premiers réalisés. Le principe d'enregistrement est le suivant :

Le faisceau laser est séparé en deux : l'un formant l'onde de référence, l'autre éclairant la scène à enregistrer. Ces deux ondes sont situées du même côté de la plaque d'enregistrement mais séparées angulairement et l'onde de référence est toujours située hors de l'axe, ce qui permet d'obtenir des images de bonne qualité.

Depuis que l'on dispose de lasers puissants ayant de grandes longueurs de cohérence d'une part, de plaques d'enregistrement de grand format d'autre part, il est possible de réaliser des hologrammes représentant des scènes de plusieurs mètres cube. Il est à souligner que les plus grands hologrammes du monde de ce type ont tous été réalisés en France : d'abord au laboratoire d'optique de la faculté des sciences de Besançon (labo associé au CNRS aujourd'hui appelé "Laboratoire P.M. Duffieux), ensuite par la société Holo-Laser, société créée en 1978 par J.L. Tribillon, lauréat national de la création d'entreprise. Les plaques d'enregistrement avaient un format de 1 m x 1,50 m et les scènes enregistrées plusieurs mètres de profondeur.

⁶ Premier symposium international d'holographie - Laboratoire d'Optique de Besançon - 1970.

L'image restituée, au lieu de se trouver de l'autre côté de la plaque par rapport à l'observateur, peut être projetée en avant de celle-ci. L'effet obtenu est beaucoup plus saisissant. L'image "flotte" entre la plaque et le spectateur.

L'obtention de telles images holographiques nécessite un double enregistrement. Un premier hologramme est enregistré et développé. A la restitution celui-ci est tourné de 180° autour de son axe vertical, une image pseudoscopique est donc projetée devant la plaque. Un second hologramme est alors enregistré, l'image pseudoscopique réelle jouant le rôle d'objet. A la restitution, cet hologramme est également tourné de 180° et une image réelle orthoscopique apparaît.

L'obtention d'hologrammes de bonne qualité, suivant cette technique, passe par l'aménagement des trois contraintes suivantes : stabilité mécanique de l'ensemble (en fraction de longueur d'onde du laser), modulation des franges (rendement de diffraction), choix des bains de développement. Il faut disposer de lasers de forte puissance et de plaques holographiques de grand format. Ces images holographiques sont monochromatiques (couleur du laser).

Aujourd'hui ce type d'hologrammes image n'est plus réalisé, ni en France, ni ailleurs dans le monde, sauf comme hologramme primaire pour l'enregistrement d'autres types d'hologrammes image : transmission et réflexion lumière blanche et embossée.

Hologrammes transmission lumière blanche

Ce type d'hologramme a été présenté pour la première fois en 1969 par S. Benton qui travaillait alors chez Polaroid Corporation aux USA. Ce principe en est le suivant :

On enregistre un hologramme transmission laser conventionnel avec une onde plane. On masque ensuite l'hologramme ne laissant son observation possible qu'à travers une fente étroite horizontale. On enregistre un deuxième hologramme de l'image réelle pseudoscopique projetée à travers la fente. Le second hologramme n'a pas de parallaxe verticale puisqu'il contient seulement l'image qui serait vue à travers la fente étroite de l'hologramme original. Ce dernier hologramme reconstruit avec un simple spot de lumière blanche (ou le soleil) présente une séparation de couleur suivant l'axe vertical, comme donc un arc en ciel (d'où son nom original "rainbow hologram").

L'image observée est très brillante, visible en lumière blanche. Quand l'observateur se déplace verticalement; les couleurs changent, mais ne s'étalent pas. Par multiplexage spatial, il est possible de réaliser des hologrammes multicolores. Les plus grands hologrammes du monde réalisés avec cette technique l'on été en France par la société Holo-Laser.

Un marché trop étroit ne permet pas de croire à leur pérennité à seule fin d'imagerie pour la communication et/ou la promotion de produits commerciaux. Par contre, cette technique sert de base pour réaliser les hologrammes matricés comme nous le verrons plus loin.

Hologrammes réflexion lumière blanche

Les premiers hologrammes réflexion lumière blanche furent réalisés par Y. Denisyuk et ses collaborateurs, en ex URSS, fin des années 1960 début des années 1970. Le principe d'enregistrement d'un tel type d'hologramme est le suivant :

L'onde de référence est plane et en moyenne, parallèle à la plaque d'enregistrement. L'onde objet provient de l'objet mais par rapport à la plaque holographique d'enregistrement, dans le sens opposé. Ainsi, les franges d'interférences, au contraire des hologrammes de Fresnel, baptisé pour ce texte : "hologrammes type transmission laser", "hologramme type transmission lumière blanche", ne sont plus des interférences enregistrées dans la surface du matériau d'enregistrement (jusqu'à maintenant plutôt un matériau argentique type gélatine), mais dans son épaisseur.

Pour cela, on passe d'un besoin de résolution spatiale de l'ordre de 1000 traits par millimètre à plutôt de l'ordre de 3000 à 5000 traits par millimètre. Ce besoin nécessite donc de disposer de matériaux d'enregistrement permettant d'atteindre de tels chiffres. Concernant les matériaux argentiques, type gélatine, cela nécessite que la dimension des grains argentiques dans la gélatine soit la plus petite possible. Deux conséquences à cela : la sensibilité énergétique est plus faible, donc les temps de pose plus longs, d'où les problèmes de stabilité mécanique de l'ensemble du montage d'enregistrement, les problèmes de rétrécissement de la gélatine qui introduisent des changements de pas des franges et donc de couleur en final. Ces points sont physiquement fondamentaux et corrélativement très critiques.

La couleur de l'image holographique restituée est donnée par l'espacement de franges pendant l'enregistrement, modifiée par le développement chimique des plaques d'enregistrement, d'où la nécessité d'une bonne connaissance du matériau d'enregistrement et des procédés de développement : développement, lavage, blanchiment, lavage, fixation, lavage, séchage. A la restitution, c'est-à-dire pour l'observateur, si tout, avant, a été "bien fait", plus la source de restitution est ponctuelle, plus la qualité de l'image est bonne. A contrario, pour ce type d'hologrammes, il faut noter, qu'en particulier, la dimension des grains de la gélatine limite la profondeur des scènes enregistrables.

Dans ce type d'hologrammes images, il n'y a aucun doute, les meilleurs spécialistes furent et sont encore à Saint-Petersbourg en ex URSS. Personne, aucun labo occidental, n'a atteint leur qualité. J'ai vu. Dans le monde, hors ex-URSS, peu de laboratoires ont enregistré ce type d'hologrammes et pour la plupart ce ne furent que quelques exemples. D'un point de vue commercial, seule la société Holo-Laser, en France, a développé ce type d'hologrammes, avec aussi les plus grands hologrammes du monde : format 50 x 60 cm, profondeur de scène de l'ordre de 50 cm.

Stéreoogrammes ou hologrammes multiplex

Mis au point par L. Cross (1977), USA, Compagnie "Multiplex Corporation", ils sont une synthèse ingénieuse de nombreuses technologies (voir en particulier les travaux de Pole, de Bitteto, King, George, Redman, Benton), ... La procédure d'enregistrement est en général la suivante :

Une scène est filmée en 35 mm noir et blanc, avec un mouvement transversal de caméra ou la posant sur un plateau tournant. On fabrique ainsi 1000 à 3000 images correspondant à des durées de scène de 40 sec à 2 mn. Chaque image 35 mm est éclairée au laser, projetée à travers une lentille cylindrique et enregistrée sous forme d'hologramme bande (comme pour

l'hologramme transmission lumière blanche, mais l'objet est plan = film 35 mm). Le produit final est un hologramme stéréographique qui se présente sous forme cylindrique qui peut être reconstruit par une lampe blanche à filament vertical. On a ainsi l'illusion d'un objet tridimensionnel contenu à l'intérieur d'un cylindre. Cette illusion vient du fait que chaque œil voit l'objet avec une parallaxe horizontale différente.

A la restitution, soit l'observateur tourne autour du cylindre, soit le stéréogramme est installé sur un plateau tournant. La scène peut être évidemment animée.

Plus personne, dans le monde, ne fabrique ce type d'hologramme.

Hologrammes matricés ou hologrammes pressés

Depuis une vingtaine d'années des hologrammes matricés sont apparus sur le marché. Leurs qualités furent inégales. Une des raisons, sans doute, est que peu de laboratoires possédaient la maîtrise complète de "la chaîne de production". Celle-ci se décrit de la manière suivante :

La fabrication de ces hologrammes repose sur un "master" enregistré de façon classique : type hologramme transmission lumière blanche, mais pas dans un matériau d'enregistrement type argentique (gélatine), dans un matériau qui, au lieu de mémoriser l'information sous forme de franges d'interférences "noires et blanches", le fait dans un matériau (photoresist) permettant d'obtenir un vrai relief de surface coïncidant géométriquement, spatialement, avec la répartition des franges d'interférences. Après développement, le relief ainsi obtenu est utilisé pour générer par électroformage une matrice, en général de nickel, laquelle sert ensuite à fabriquer d'autres matrices secondaires, elles-mêmes mises en œuvre pour emboutir, embosser, presser des matériaux plastiques tels que le mylar, le PVC, le polyester. Un dépôt métallique, souvent a posteriori, permet, ultérieurement, de lire ces hologrammes par réflexion. En général, un vernis de protection est déposé. Suivant les procédures techniques employées, ces hologrammes peuvent être préencollés (stickers) ou déposés directement sur le substrat final par transfert à chaud (plastique : cartes de crédit, papier : billets de banque).

Des dizaines de millions d'hologrammes de ce type ont déjà, à ce jour été fabriqués et commercialisés. Les exemples les plus remarquables par leur qualité et/ou pour leur aspect "pionnier" ont été avec les trois couvertures de la revue américaine National Geographic (mars 1984, novembre 1985, février 1989), la couverture de Photograph Amateur (1983) du côté américain, la couverture de la revue Soft et Micro (février 1985) de la revue Ferrari (1988) du côté européen (Holo-Laser). Aujourd'hui, l'hologramme matricé (ou encore appelé hologramme pressé) trouve sa principale application dans le domaine de la monétique. La plupart des cartes de crédit ont des hologrammes matricés visibles. Les billets de banque nouveaux, l'euro en particulier en ont également. Cette technique permet de renforcer la sécurité des objets. En France une petite société travaille bien dans ce domaine. Il s'agit de la société Hologrammes Industrie.

Jusqu'à aujourd'hui les hologrammes pressés utilisés en monétique sont des hologrammes images dans le visible. Pour le futur on pourrait imaginer des hologrammes codés, des hologrammes dans l'invisible, ...

Hologrammes couleurs

Le multiplexage spatial d'une part, et l'utilisation de trois longueurs d'onde différentes à l'enregistrement, ont été les deux grandes voies explorées. De fait, depuis plus de trente ans, depuis l'apparition des premiers hologrammes monochromatiques, les possibilités

d'enregistrer des hologrammes en vraies couleurs de très bonne qualité sont restées extrêmement limitées.

Parfois des images holographiques ont été référées comme étant des hologrammes "pleine couleur", "couleur naturelle", "pseudo-couleurs". Le mot le plus logique qui vient à l'esprit en analogie à la photographie couleur, les films couleur, la télévision couleur, devrait être "hologramme couleur". Quel que soit le terme choisi, il est quelquefois possible de faire objection à ce terme pour les raisons fondamentales suivantes : il existe des couleurs d'objet que nous voyons normalement dans notre environnement qui sont impossibles à enregistrer holographiquement puisque les hologrammes peuvent seulement reproduire les couleurs des objets créées par la lumière laser diffusée (lumière consistant en différentes longueurs d'onde, typiquement trois, dans le rouge, dans le vert, dans le bleu). De plus les couleurs que nous voyons sont souvent le résultat de la fluorescence qui ne peut être enregistrée dans un hologramme. Par exemple, certains colorants et objets en plastique arrivent à leur brillance, à des couleurs saturées par fluorescence. Néanmoins, cette limitation en holographie couleur, ne me semble pas être dramatique. Toutefois, qu'à propos de la couleur, il n'est peut être pas inutile de rappeler que l'œil discerne 150 rayonnements chromatiques (+ 20 pourpres), que du point de vue de la saturation il a 8 niveaux dans le jaune, 20 à 25 niveaux dans le rouge et le bleu et que pour la clarté il dispose de 30 échelons entre le blanc et le noir. Pour faire des hologrammes couleur il faut au moins trois choses :

- 3 lasers émettant chacun dans le rouge, le vert, le bleu,
- une plaque d'enregistrement holographique panchromatique, c'est-à-dire sensible chromatiquement aux 3 longueurs d'onde (aux 3 couleurs),
- un savoir-faire "optique", "laser", "chimique" pour le traitement des plaques d'enregistrement, : développement, fixation, blanchiment... .

En 1992, Jean-Louis Tribillon chargé officiellement d'une mission d'expertise et d'évaluation en optique et en optronique en ex-URSS découvrit l'existence de plaques holographiques panchromatiques (c'est-à-dire pouvant enregistrer simultanément trois longueurs d'onde laser différentes : rouge, vert, bleu). Cette réalité offrait aux yeux des spécialistes une nouvelle voie de recherche. En 1995, Jean-Louis Tribillon propose à l'Institut Franco-Allemand de recherches de Saint-Louis (ISL - Alsace) un programme de recherche et sa participation. Une étroite collaboration s'établit alors entre, particulièrement, Félix Albe (ISL) et Jean-Louis Tribillon (DGA). Ils obtinrent, dès 1996, des résultats très prometteurs. Depuis, grâce donc à l'existence des plaques holographiques panchromatiques russe auxquelles l'accès fut facilité par l'intervention de Jean-Louis Tribillon, l'holographie couleur a connu un développement.

Le potentiel d'applications scientifiques et techniques est très grand. Toute la communauté scientifique le sait (voir congrès international de haut niveau). En particulier l'interférométrie holographique en couleur au laser trouve déjà des applications importantes. L'ISL (F. Albe), l'ONERA (J.M. Desse), la DGA (J.L. Tribillon), en mettant leurs compétences en commun, ont, pour la première fois dans le monde, mis au point une **méthode de contrôle** par interférométrie holographique trichromatique (vraies couleurs), en temps réel, *créant ainsi un outil d'investigation de très grande précision absolue* et facile à mettre en œuvre. Ils ont appliqué cette méthode en aérodynamique pour l'essentiel mais on peut citer aussi l'étude des brouillards, celle des explosions, l'analyse d'aérosols, ... A notre connaissance, cette "équipe" est la seule dans le monde, à ce jour, à avoir présenté de tels résultats (voir congrès internationaux). Jusqu'ici nous n'avons évoqué que des hologrammes couleur enregistrés avec des lasers continus. Dès 1996, Félix Albe et Jean-Louis Tribillon ont continué leurs travaux simultanément avec des lasers continus et des lasers pulsés. Ils sont les premiers dans le

monde (et peut-être les seuls) à avoir enregistré des hologrammes couleurs avec des lasers pulsés. Pourquoi ? Il n'existait pas de lasers pulsés de qualité holographique (cohérence spatiale et temporelle) émettant dans le bleu jusqu'à ce que deux chercheurs français, A. Hirth et Y. Lutz, de l'Institut Franco-Allemand de Recherches de Saint-Louis (ISL) en réalisent un. L'ISL a vu immédiatement l'intérêt de ce type d'hologrammes pour des applications à la balistique et à la détonique, domaines dans lesquels cet Institut est reconnu internationalement. En ce qui concerne l'holographie couleur, jusqu'à ce jour, très peu d'équipes dans le monde ont obtenu des bons résultats :

- Hologrammes couleur enregistrés avec des lasers continus : Markov (Ukraine), Shevtsov (Russie), Bjelkagen (USA), Kuboto (Japon), Albe, Desse, Tribillon (France),
- Hologrammes couleur enregistrés avec des lasers pulsés : Albe, Tribillon (France),

La France, dans le domaine de l'hologramme couleur, est en avance. Il faut continuer, voire simplifier, pour proposer, en plus des images pour des images, une métrologie ultra-fine et ultra-performante pour répondre aux besoins d'aujourd'hui et de demain.

5.6.2 Matériaux holographiques (C. Carré Morlet-Savary)

5.6.2.1 Les différents matériaux

Le premier matériau utilisé pour l'enregistrement d'hologrammes était l'émulsion argentique. Elle est constituée de gélatine contenant des cristaux d'halogénures d'argent en suspension (bromure et chlorure d'argent). Les plaques argentiques à très haute résolution qui étaient commercialement disponibles (Agfa Geavert, Ilford ou Kodak), ont vu leur production stoppée depuis quelques années, suite aux évolutions de la spectroscopie. Le savoir-faire correspondant à ce support pour l'holographie est aujourd'hui l'apanage de quelques scientifiques dans le monde :

- certains (français en particulier) ont acquis et optimisé le procédé russe « Slavitch »,
- d'autres chercheurs (par exemple de l'Université de Liège associée ici au Centre Spatial de Liège –Belgique) ont obtenu des résultats très prometteurs dans ce domaine. Faute de moyens matériels, ils sont malheureusement restés au stade du laboratoire et aucune structure capable de relancer une telle production n'a été créée,
- quelques chercheurs présentent des hologrammes enregistrés avec leurs propres émulsions au cours des congrès internationaux tels que ceux organisés par la SPIE, même si les images sont a priori de haute qualité (chercheurs chinois en particulier).

La gélatine bichromatée bien que maîtrisée au stade industriel nécessite des moyens sophistiqués pour en garantir les performances. Ce matériau est constitué de gélatine et de bichromate d'ammonium. Après enregistrement, l'émulsion doit subir un post-traitement constitué de plusieurs bains différents (durcissement de la gélatine, gonflement, déshydratation et séchage) afin de créer dans le milieu une modulation d'indice de réfraction supérieure à 0,1. C'est l'ensemble de ce post-traitement qu'il faut pouvoir contrôler rigoureusement. Elle s'adresse soit à des marchés de niche (en particulier dans le domaine des éléments optiques diffractants où les rendements de diffraction doivent proches de 100%), soit aux laboratoires ayant acquis la maîtrise du procédé et l'utilisant pour la validation de nouveaux concepts.

Les cristaux photo-réfractifs tels que le niobate de lithium (LiNbO_3) ou les oxydes de bismuth et de silicium (BSO) donnent naissance à des hologrammes de phase épais reconfigurables. Sous l'action d'un éclairage holographique inhomogène et d'un champ électrique extérieur appliqué, il y a apparition dans le matériau d'une répartition de charge non uniforme qui, par effet électro-optique, crée une modulation d'indice de réfraction. Il s'agit d'un système réinscriptible, il suffit de les ré-éclairer à la longueur d'onde d'écriture pour effacer l'information. Cette propriété peut être un inconvénient pour certaines applications. Indépendamment de cet aspect, un des principaux inconvénients est la nécessité d'obtention de cristaux parfaitement homogènes, ce qui n'est pas évident et doit être réalisé par des laboratoires spécialisés (Bordeaux par exemple). Ceci explique que ce matériau n'est pas produit en grande quantité et qu'il est un coût élevé. Il entre dans des applications spécifiques, telles que l'interférométrie ou l'optique non-linéaire. Des projets ont vu le jour dans le domaine des mémoires holographiques (en France tel qu'à l'IOTA), mais sont à l'heure actuelle toujours au stade du laboratoire.

Les photothermoplastiques correspondent à un matériau commercialement disponible (caméra holographique). Lors de l'enregistrement, le système est chargé par effet Corona pour créer un champ électrique ayant un profil identique à celui de la figure d'interférences incidente. Le matériau est ensuite ramolli par chauffage (60 à 100°C) et sa surface se déforme sous l'action du champ électrique. Après refroidissement, les informations sont stockées sous forme d'une modulation d'épaisseur. Le principal inconvénient est la faible gamme de fréquences spatiales pouvant être enregistrées (500 à 1200 traits/mm). Aujourd'hui, ils sont de moins en moins utilisés, en dehors d'applications spécifiques telles qu'en interférométrie holographique.

Les autres matériaux photosensibles proposés pour l'holographie sont les photopolymères. Plusieurs grandes familles peuvent être définies :

- La première est celle des **systèmes photo-polymérisables** tout organiques et qui est celle qui connaît les développements les plus importants tant dans le monde de la recherche universitaire que dans le milieu industriel. Le support d'enregistrement est constitué d'un photo-sensibilisateur, d'un ou plusieurs monomères qui jouent simultanément le rôle de matrice ou qui sont dissous dans un polymère. Lors de l'enregistrement, les photons incidents sont absorbés par le colorant qui donne naissance à une espèce capable d'amorcer la réaction de polymérisation. Si le monomère est multifonctionnel, il y a alors création d'une structure tridimensionnelle rigide non uniforme. Les informations lumineuses sont généralement stockées sous forme d'une modulation d'indice de réfraction due à la différence d'indice entre polymère et monomère, ainsi qu'aux variations de densité de matière apparaissant au travers des processus de diffusion des molécules. Ces derniers ont pour origine les gradients de concentration se mettant en place lors de l'irradiation inhomogène. Lorsque le milieu contient aux moins deux monomères différents, n'ayant pas la même réactivité et/ou le même indice de réfraction, c'est le monomère le plus réactif qui polymérise dans les zones claires alors que, dans les zones sombres, le copolymère s'enrichit en monomère le moins réactif. Ceci donne naissance à une modulation d'indice de réfraction plus élevée. Les grandes familles de monomères mises en œuvre sont les acrylamides, les méthacrylates et les acrylates.

L'inconvénient majeur de ces systèmes est la faible sensibilité énergétique comparée à celle des émulsions argentiques (le facteur est de l'ordre de 10^4). Même si le rendement chimique de la réaction photochimique est proche de l'unité pour les systèmes photo-polymérisables,

les argentiques restent de loin les plus performants grâce au post-traitement chimique qui permet d'amplifier la réaction. Par ailleurs, ils ne sont pas recyclables. En revanche, ce sont des matériaux simples et rapides d'emploi, bon marché, stables à l'humidité et donnant des rendements de diffraction élevés. Ils ne nécessitent pas de développement chimique, une post-irradiation ou un post-traitement thermique peut être mis en jeu afin de compléter la réaction de polymérisation et stabiliser les franges sombres.

Dans ce domaine, plusieurs laboratoires mondiaux (et français) ont investi beaucoup d'efforts depuis une vingtaine d'années. Une production industrielle de film n'a pu jusqu'à présent aboutir que chez DuPont (US). Ce monopole constitue un risque certain pour les industries qui l'utilisent.

- Pour la seconde, le milieu réactionnel est constitué uniquement d'un **polymère dopé par un photo-sensibilisateur** accroché ou non aux chaînes polymères. Sous l'action des photons incidents, ce dernier réagit avec la matrice polymère. Entrent alors en jeu des réactions de dégradation des chaînes ou de réticulation (création de ponts entre les chaînes) qui modifient localement la structure du polymère et donc ses propriétés optiques.

En particulier, les matériaux de type PMMA sont aujourd'hui utilisés, mais présentent des qualités optiques moindres en terme de résolution, rapport S/B ou de stabilité. Ils sont principalement développés pour des applications de type stockage optique haute densité, aussi bien en France que dans le reste du monde. D'autres grandes familles de polymères sont proposées par les laboratoires de recherche, en particulier les matrices d'alcool polyvinylique (Mulhouse, Liège, Québec...) ou de polyvinylcarbazole (le principal inconvénient de ce milieu est son développement humide).

Les photoresists appartiennent à cette catégorie. Ils correspondent à un produit commercial et sont le support mis en jeu pour la production d'hologrammes en grand nombre par estampillage. Deux types sont disponibles, ils nécessitent tous les deux un post-traitement chimique qui permet de donner naissance à un relief image de la figure d'interférences incidente. Pour les photorésists négatifs (positifs), les zones exposées deviennent insolubles (solubles) par photo-réticulation (coupure de chaînes). Celles qui ne sont pas irradiées sont dissoutes (insolubilisées) lors du développement.

- Les **matrices polymères hôtes** (elles accueillent une ou plusieurs molécules actives et ne participent pas à la réaction) peuvent aussi être citées. Elles sont aujourd'hui très ponctuellement mises en jeu pour l'holographie. Il s'agit des systèmes à base de bactériorhodopsine (la matrice peut être constituée de gélatine, de polyvinylalcool ou de polyéthylène glycol), ainsi que des polymères contenant des photochromes ou des colorants azoïques.

- Les **matériaux organo-minéraux** synthétisés par voie sol-gels peuvent aussi être candidats et constituent ici la troisième famille. Reposant sur les mêmes concepts que les sol-gels traditionnels, ces nouveaux matériaux ont, en outre, la particularité de repousser les limites intrinsèques des propriétés des matériaux photopolymères 100% organiques (résolution spatiale, stabilité thermique et mécanique). L'utilisation des sol-gels hybrides permet d'appliquer les mêmes principes, en conservant les avantages du procédé (simplicité, flexibilité), tout en tirant partie des avantages intrinsèques des matériaux sol-gels hybrides. En particulier, la partie minérale du matériau lui confère une dureté supérieure par rapport aux photopolymères tout-organiques. Initialement formulés pour l'enregistrement de réseaux dans

l'UV, ces systèmes sont aujourd'hui capables d'enregistrer des réseaux présentant des rendements de diffraction à 80%. Ils peuvent être mis en jeu pour l'holographie trois couleurs puisqu'ils sont capables de mémoriser les informations lumineuses sous forme d'une modulation d'indice de réfraction aussi bien dans le rouge, le vert ou le bleu. De plus, ces matériaux sont auto-développants.

Actuellement, plusieurs laboratoires universitaires ou industriels se focalisent sur ce matériau (un brevet a été déposé par des japonais (Dai Nippon Printing Co.) antérieurement de quelques semaines des français qui effectuaient une démarche similaire). C'est donc une direction à ne pas manquer et qu'il faut soutenir. Une approche originale du matériau hybride du point de vue du photo-chimiste est en cours à Mulhouse. Elle confère une expertise inédite qui profite simultanément à la communauté des opticiens et à celle des chimistes inorganiciens. La versatilité du procédé sol-gel autorise en effet de nombreuses modifications dans la composition pour obtenir des propriétés particulières.

5.6.2.2 Des évolutions à accompagner

Il est clair que différents matériaux photopolymères autres que ceux de chez DuPont ou ceux issus de Polaroid peuvent être proposés, en particulier en France ou en Irlande. Ils pourraient prendre aujourd'hui une place grandissante dans le développement des moyens de stockage de l'information ou de la communication, grâce à la richesse de l'ingénierie moléculaire, la facilité de mise en forme et la flexibilité des compositions chimiques, aux faibles coûts, ainsi que grâce à leurs propriétés optiques et mécaniques... Mais, la mise en œuvre de ces systèmes nécessite l'étude et une bonne compréhension de l'ensemble des processus physico-chimiques apparaissant au cours de l'illumination, ainsi que l'identification des relations existant entre la nature chimique des composés et leurs propriétés optiques. Il correspond à un travail fondamental incontournable, permettant de parvenir à l'optimisation des matériaux et, donc, à des applications performantes.

C'est à ce niveau que se trouve le frein à un quelconque développement. Même si les propriétés des matériaux ont su être séduisantes et suffisamment vastes (publications, établissement de collaborations), les résultats n'arrivent pas à aller au-delà de l'étape de faisabilité à cause de la difficulté d'établissement d'un dialogue entre industriels et chercheurs universitaires. De plus, le chimiste met en œuvre une approche basée sur l'aspect moléculaire du mécanisme d'enregistrement par polymérisation et non pas sur l'analyse physique des paramètres optiques liés à la construction de l'élément considéré. Il faut donc trouver une solution pour concilier tous ces aspects afin qu'un dialogue s'établisse entre opticiens et des chimistes, entre chercheurs et industriels simultanément.

Vers une nouvelle technologie pour le stockage :

Par ailleurs, afin de répondre aux énormes besoins de stockage actuellement pressentis et destinés à la constitution de banque de données, des recherches actives sont ou ont été menées aussi bien par des industriels (IBM, InPhase, Lucent Technologies, Aprilis...) que des universitaires (Mulhouse en collaboration avec l'IOTA). En dépit de tous ces efforts, aucun système ne s'impose à l'heure actuelle et le stockage holographique semble être toujours une solution prometteuse. La mise au point des mémoires holographiques, dont les capacités se mesurent en téraoctets de données dans quelques centimètres cubes, bute encore sur le choix

du matériau de stockage. Les photopolymères sont dans la course et concurrencent les cristaux photo-réfractifs. Il est donc urgent de se donner les moyens de concurrencer les groupes américains et d'établir des consortiums ou seront simultanément présents des spécialistes des matériaux, des opticiens et des industriels qui doivent se lancer dans l'aventure et ne pas se contenter d'exprimer leur soutien, sans réellement intervenir.

5.6.3 Holographie numérique (P. PICART)

5.6.3.1 Introduction

Les systèmes optiques de mesures basés sur l'holographie et les techniques dites connexes telles que l'interférométrie de speckle sont d'un intérêt certain pour les mesures sans contacts et non invasives. Il apparaît possible d'étudier des structures soumises à des sollicitations pneumatiques, thermiques, mécaniques, en régime statique, stationnaire ou transitoire. En effet, ce type de capteurs permet une évaluation globale qualitative et quantitative. Les conférences internationales qui ont eu lieu dernièrement en Europe sur ce sujet montrent la richesse et la diversité de méthodes et applications qui en découlent. L'holographie, inventée en 1947 par D. Gabor, présente l'avantage de restituer directement toute l'information de phase et d'amplitude de l'objet. L'holographie sur support argentique a fait l'objet de nombreuses recherches et applications au cours des 35 dernières années. L'holographie numérique avec un détecteur matriciel s'est concrétisée au début des années 1990 (BIAS - G) bien que décrite une première fois en 1972, puis actualisée en 1980. En effet, les avancées technologiques liées aux capteurs d'images à couplage de charges (CCD) ont permis cet essor. Ces derniers offrent maintenant des tailles et résolutions compatibles avec les contraintes liées à l'enregistrement avec par exemple des matrices de $1636 \Delta 1238$ pixels chacun de taille $3,9 \Delta 3,9$ microns².

5.6.3.2 Evolution ces 10 dernières années

Ces dernières années, des possibilités fascinantes de l'holographie numérique ont été démontrées: imagerie par polarisation ou par contraste de phase (EPFL - CH), imagerie à travers les milieux diffusants (Lab. Kastler Brossel - F), microscopie 3D (au Japon et ITO - G), holographie numérique couleur (Yamagushi, Riken, Wako, Japon), mesure de profil de surface (Japon et avec J.L. Tribillion et Lab. P.M. Duffieux en France), mesure de paramètres de micro composants (BIAS - G), imagerie par synthèse d'ouverture (Laboratoire de recherches de Thales – F et Univ. Aalen - G), compensation des aberrations (Univ. Aalen - G et Institut de Cybernétique, I), vélocimétrie par image de particules (CORIA – F et Lab. TSI - F), multiplexage spatial et intégration temporelle (LAUM - F). Par ailleurs, l'essor de sources lasers pulsées à double impulsions hautes énergies, robuste et fiable, permet des premières applications en mécanique (ITO - G). L'holographie numérique est également une technique d'avenir pour la comparaison et la reconnaissance d'objets 3D ou le codage sécurisé d'images comme en témoignent les travaux récents sur ce sujet (BIAS – G et Univ. of Connecticut US).

5.6.3.3 Positionnement de la France

La France n'est pas absente de ce domaine en plein essor puisqu'on recense six équipes à la pointe de cette spécialité. Toutefois, l'effort est porté sur les potentialité de l'holographie numérique pour la mesure.

5.6.3.4 Conclusions et perspectives

Il est souhaitable que la France poursuive son effort dans ce domaine puisque les techniques holographiques numériques couplées à la couleur dans l'avenir seront certainement, de part

leur versatilité, à la base de progrès scientifiques et technologiques dans un grand nombre de domaines. Cependant, pour les applications en codage d'images, l'holographie numérique souffre d'un manque de résolution spatiale imposé par l'état de l'art actuel de la technologie des capteurs matriciels. Pour fixer les ordres de grandeurs, avec une matrice 1360×1024 et des pixels de taille $4,6 \times 4,6 \text{ microns}^2$, le diamètre maximum enregistrable est de l'ordre de 45 mm à 1 mètre. A l'heure actuelle, les applications sont donc limitées à des objets de petites dimensions. On peut imaginer qu'à l'avenir la taille des pixels diminue d'un facteur 3 environ, mais ceci n'augmentera pas considérablement la résolution car la largeur des matrices doit aussi être prise en compte. L'effort de recherche doit donc porter sur la mise en œuvre de grandes matrices de tailles très supérieures à 2000×2000 pixels et des pixels de l'ordre du micron.

5.7 Composants photovoltaïques pour la production d'énergie

*Jean ClaudeMULLER
Laboratoire Phase UPR CNRS Strasbourg*

5.7.1 Evolution du domaine

Le secteur des composants opto-électroniques qui se développe le plus rapidement est sans conteste, celui du photovoltaïque (PV) pour une production d'électricité basée sur la conversion de la lumière du soleil.

Pour le moment, plus de 85% des cellules sont à base de silicium cristallin, qui est la voie la plus avancée sur le plan technologique et industriel. En effet, le silicium est l'un des éléments les plus abondants sur terre, parfaitement stable et non toxique. A l'avenir d'autres matériaux, au stade pré-industriel ou encore au niveau de la recherche et même au niveau de la validation des concepts viendront contribuer à la stimulation de ce marché très prometteur.

En vingt cinq ans, le prix du watt photovoltaïque a considérablement baissé de plus de 100 Euros en 1975, il est aujourd'hui tombé aux environs de 2 Euros avec une production industrielle mondiale en plein essor (plus de 30% de croissance en moyenne du marché par an depuis 5 ans).

La production de module a été de l'ordre de 550 MWc en 2002 (vingt fois plus qu'il y a 15 ans) et les prévisions à l'horizon 2010 prévoient une multiplication par 20 de la production.

5.7.2 Champs d'application et marché

Les applications du photovoltaïque couvrent tous les types de demandes énergétiques tels que : pour les sites isolés, l'alimentation en électricité des relais de communications, balises, dispositifs de sécurité et autres systèmes par le biais d'un stockage sur batteries ; les besoins des pays en voie de développement (pompage de l'eau, éclairage, réfrigération) et pour les pays développés, la production d'une électricité décentralisée (essentiellement sous forme de toits photovoltaïque connectés aux réseaux plutôt que des centrales).

Deux pays dominent le marché du photovoltaïque. L'industrie japonaise est la première du monde avec une production annuelle en 2002 de 258 MW de cellules photovoltaïques, soit près de 50 % de la production mondiale, distançant l'Europe et les États-Unis, ex-leader du secteur (avec de plus de nombreuses sociétés passées sous contrôle européen).

Au Japon, 600 MW de générateurs photovoltaïques (dont 80 % de systèmes domestiques sous forme de toits PV et 150 MW pour la seule année 2002) sont opérationnels à ce jour. L'Allemagne a installé sur son territoire 80 MW durant cette même année, mais qui n'ont pu être satisfaits par la production locale de modules PV qui n'est encore que de 20 MW.

Le centre névralgique du photovoltaïque mondial se situe dorénavant dans la région d'Osaka avec les sociétés du silicium cristallin Sharp, Kyocera, Sanyo, Mitsubishi et la société du silicium amorphe Kaneka. Avec des capacités de production considérables (Sharp, leader mondial passe de 150 MW à 200 MW par an, Kyocera annonce 100 MW en 2004) investissent de plus en plus le marché mondial et européen.

5.7.3 Etat de l'art et évolutions des recherches

Pourtant, malgré l'immense chemin parcouru, l'électricité solaire n'a pas encore franchi le seuil lui permettant d'être compétitif par rapport aux autres sources de production d'électricité. Ceci nécessite sans cesse de nouvelles approches technologiques afin de réduire les coûts de production tout en augmentant le rendement de conversion des cellules.

De plus, il reste encore des verrous technologiques à briser relatifs à la fabrication des cellules solaires qui sont trop gourmandes en énergie et pas sans répercussion sur l'environnement. En effet, si la cellule photovoltaïque permet de produire de l'électricité sans aucun rejet dans l'atmosphère, beaucoup de procédés actuels de fabrication (proches de ceux de la micro-électronique) mettent encore en jeu trop d'opérations nécessitant l'usage de produits chimiques et de gaz extrêmement toxiques

Pour les cellules à base de plaquettes en silicium cristallin (85 % du marché mondial) et dont les rendements en laboratoire (24,7%) ont atteint les limites théoriques du silicium et les rendements industriels dépassent souvent les 16 % sur de grandes surfaces, l'avenir passe par une réduction drastique des coûts.

Pour les cellules en couches minces (dont le Si amorphe représente 10 % du marché avec des rendements de 6-8 %), l'objectif majeur reste l'augmentation des rendements de conversion sur le silicium (amorphe, polymorphe, micro- et poly-cristallin) ainsi que sur les matériaux composés de chalcogénures (CIGS).

Pour les cellules du futur à semi-conducteurs organiques (3% en début de vie) ou à base de matériaux nano-structurés une recherche fondamentale de base est encore nécessaire. Enfin dans le domaine des composants et de l'architecture des systèmes générateurs, l'enjeu majeur est l'intégration au réseau (y compris de systèmes hybrides de toutes tailles) ainsi que l'intégration de la conversion en puissance à l'échelle du module et de la cellule.

5.7.4 Position de la France

Les différents programmes nationaux (ADEME-CNRS-CEA en partenariat avec l'industrie photovoltaïque) et européens de la DG Recherche ont permis de maintenir la recherche française au niveau mondial. Les réflexions en cours au niveau du GAT « Cellules

photovoltaïques du futur » du Programme Energie du CNRS avec les industriels du domaine (PHOTOWATT dans les 10 premiers mondiaux avec 20 MW, EMIX pour un nouveau matériau et SOLEMS et FEE pour l'amorphe) ont permis de recommander les objectifs prioritaires suivants :

Rendre moins chères et plus efficaces les technologies existantes à base de plaquettes en silicium cristallin (dites de 1ère génération, dont les rendements industriels atteignent 16 % et représentent 85 % du marché mondial) afin de faciliter l'intégration du PV dans les réseaux électriques à un coût visé de 0,10 €/kWh. L'enjeu sera d'obtenir des rendements de conversion des cellules de l'ordre de 18 à 20 % avec un coût du module inférieur à 1 €/W en utilisant efficacement les matières premières dans des procédés mettant l'accent sur des plaques minces. Ceci s'effectuera dans le cadre d'un programme national ADEME-CEA-CNRS et les Industriels du PV autour d'une plate-forme technologique au CEA.

Développer industriellement les filières de 2ème génération à base de cellules en couches minces (10 % du marché) par la mise au point de procédés à haut débit et haut rendements (12-15 %) sur de grandes surfaces, soit par cristallogénèse de gros grains ou par transfert d'un film de silicium, soit par des dépôts à basse température de silicium amorphe/polymorphe ou de chalcogénures (dont le développement industriel est prévu sur la future plate-forme CISEL du projet ADEME-CNRS-EDF-St GOBAIN). Les objectifs fixés avec les industriels, sont le développement de nouvelles structures tandem et de modules de grandes tailles. Les fortes synergies induites par les nombreux points communs à ces deux filières (substrat de verre, couche conductrice transparente, gravure) permettra de nouveaux concepts de connexion des cellules tandem intégrant la conversion en puissance à l'échelle du module.

Prospecter de nouveaux matériaux en couches minces à très faibles coûts tels que les organiques (rendement actuel 3 %) à base de polymères (dérivés des fullerènes) ou de cristaux liquides en films ou réseaux interpénétrés, et développer de nouveaux concepts permettant de jeter les bases d'une future percée technologique en dépassant les limites des rendements actuels avec des nouveaux matériaux composites dont la matrices hôte est modifiée par l'incorporation de nanocristallites favorisant une conversion par multi-photons ou par luminescence.

7.1 Production de composants optiques pour l'instrumentation

(Annexe au chapitre 7.1.1)

Ce document a été réalisé avec la collaboration de Jean-Jacques CONTET (Optique Fichou – Pdt AFOP), Raymond MERCIER (IOTA – Orsay) et Dominique LAROCHE

7.1.1 Evolutions des techniques de polissage des composants optiques polissage (substrats verres, métaux, cristaux, céramiques)

Le polissage des composants optiques, quel que soit le domaine spectral, demeure une technologie indispensable à la réalisation des instruments optiques. Il faut noter que les précisions demandées pour ces composants, ainsi que la nature des substrats utilisés, évoluent rapidement depuis quelques années, ce qui a pour effet d'entraîner des évolutions importantes dans les procédés de production associés.

Ces évolutions concernent aussi bien le type de profil des composants, que la précision par rapport au profil théorique ainsi que la qualité de l'état de surface final (principalement en terme de rugosité).

7.1.1.1 Evolution des technologies de polissage des composants optiques sphériques et plans

Dans ce secteur de la production de composants optiques, les technologies classiques restent largement utilisées et les travaux de R et D menés par les industriels sont surtout orientés sur l'amélioration de la qualité des états de surface, les adaptations à de nouveaux substrats (cristaux, céramiques, ..) pour lesquels les machines automatisées de polissage ne sont pas adaptées, ou insuffisamment précises.

Concernant les moyens de production, il faut noter l'apparition sur le marché, depuis quelques années, de gammes de machines à commandes numériques permettant de réaliser la totalité des opérations d'ébauchage, doucissage, polissage, dé bordage et chanfreinage. Ces centres d'usinage sont associés à des postes de contrôle interférométriques. Ils permettent de réaliser des pièces de relativement grandes dimensions et les précisions obtenues répondent à une part importante des applications du secteur de l'optique instrumentale.

Il n'existe aucune production en France de telles machines, qui doivent être importées, principalement de RFA, et les niveaux d'investissements à mettre en place sont relativement importants par rapport aux machines conventionnelles de polissage. De plus elles font appel à des personnels qui doivent, idéalement, avoir une double formation en opérateur de machines à commande numérique et de polisseur; (aucune formation initiale ne correspond à ce profil en France)

Le taux d'équipement des industriels français en centres d'usinage optiques est encore faible et est en retard par rapport à des pays traditionnellement concurrents, mais aussi par rapport à certains pays émergents qui ne disposaient pas au départ d'une tradition de formation d'une main d'œuvre qualifiée en polissage de précision .

Enfin, certains industriels, équipés de machines d'usinage ionique ou magnétorhéologique (cf. § suivant), utilisent également ces machines pour la production de certains de leurs composants sphériques ou plans de très haute précision ou difficiles à polir conventionnellement

Toutefois ces centres d'usinage automatisés, ou ces nouvelles technologies de polissage, ne peuvent encore satisfaire à l'ensemble des besoins en polissage exprimés par les industriels français de l'instrumentation.

Ceci implique donc le maintien de capacités de production en polissage conventionnel qui seul permet, actuellement, la réalisations des pièces optiques de très hautes précision, ainsi que le polissage de certains verres, cristaux ou céramiques, et qui reste plus économique pour la réalisation de prototypes ou de séries limitées.

7.1.1.2 Evolution des technologies de polissage des composants asphériques

Pendant des siècles, les concepteurs optiques ont du se contenter d'utiliser des profils plans ou sphériques, les seuls que l'on savait réellement réaliser de façon industrielle avec des précisions suffisantes. Toutefois le besoin en instruments de plus en plus performants en terme de champ, de résolution et d'étendue spectrale, ainsi que la contrainte d'encombrements et de poids de plus en plus réduits (sous l'impulsion initiale des besoins militaires ou spatiaux, puis des instruments professionnels portables) a rendu indispensable la maîtrise de processus de réalisation de surfaces asphériques, centrées ou excentrées (pour la réalisation de télescopes spatiaux à faible encombrement) et présentant des déformées importantes par rapport à la sphère.

L'asphérisation de composants optiques a démarré de façon réellement industrielle, il y a environ 3 décennies, dans le domaine des composants infrarouges, grâce aux technologies d'usinage à la pointe diamant et à l'apparition de centres d'usinage multiaxes suffisamment précis ($\sim 1\mu\text{m}$). Toutefois cette technologie ne pouvait s'appliquer qu'à l'usinage direct des métaux ou de certains cristaux utilisés dans l'infrarouge.

Cette technologie, issue directement des techniques d'usinage mécanique, présentait l'avantage d'une grande reproductibilité, avec des durées d'usinage prédictibles, mais ceci au prix d'investissements très élevés. En France, elle a été mise en œuvre de façon industrielle par SOPELEM et par SAT/SAGEM en particulier pour des applications de défense et spatiales.

Cependant cette technologie ne peut pas être utilisée directement avec les verres optiques qui ne sont pas usinables par un outil à pointe diamant.

Pour ces matériaux il n'est possible que de générer le profil asphérique du composant en effectuant de la micro rectification à la meule diamantée sur des centres d'usinage identiques, toutefois l'état de surface obtenu (en terme de rugosité) n'est pas compatible des spécifications exigées, en particulier pour les applications dans le domaine du spectre visible, et les composants obtenus ne sont donc pas utilisables en l'état.

Pendant de nombreuses années, les industriels ont développé diverses techniques dites de « polissage souple » afin de corriger les défauts d'état de surface dus à l'utilisation des meules (ou les sillons dus à l'utilisation de l'outil diamant), tout en essayant de conserver au mieux le profil asphérique initial. Ces processus se sont en général révélés peu déterministes en terme de durée d'usinage et aléatoires en ce qui concerne le profil final, et ceci malgré la

sophistication des robots mis au point et les progrès réalisés dans l'instrumentation de contrôle interférométrique associée.

Dans la dernière décennie, d'autres technologies ont été développées pour résoudre ces problèmes d'usinage asphérique de grande précision des verres et céramiques utilisées dans le spectre visible ou dans l'U.V. En France plusieurs technologies d'usinage ionique (utilisant le principe de l'ablation de matière sous l'impact d'un faisceau d'ions) ont, en particulier, été mises en œuvre:

Dans les laboratoires de l'Institut d'optique qui ont travaillé sur un principe d'érosion ionique à faisceau large, modulé par un masque, permettant l'usinage de profils quelconques sur la totalité de la surface du composant

Cette technologie a été utilisée pour la réalisation de télescopes pour les X-UV, de petites surfaces ellipsoïdales pour imageurs X-UV, de miroirs de phase pour cavités laser, ...et pourrait être utilisée pour la réalisation d'asphérisation hors d'axe pour le projet spatial SDO. Elle n'a toutefois pas fait l'objet de transferts technologiques vers des industriels.

A la société REOSC (maintenant SAGEM), qui a développé un processus de correction localisé du profil du composant optique. Il est ainsi possible de « gommer » localement les défauts de surface générés lors de la phase de polissage souple. Les équipements de production développés permettent de travailler sur des pièces optiques, éventuellement off-axis, de plusieurs centaines de millimètres de diamètre.

Ce procédé, couplé à des moyens de contrôle interférométrique de haute précision, est fiable, reproductible avec des durées d'usinage prédictibles et restant compatibles avec des applications comme le spatial, les grands programmes scientifiques, l'astronomie, etc....

L'usinage ionique, grâce à sa capacité d'agir sur le profil du composant sans apporter de détérioration à la rugosité initiale de la surface (pouvant être de très bonne qualité car basée sur des processus conventionnels de polissage), a permis de traiter de nombreux projets critiques dans le domaine du visible ou des très courtes longueurs d'onde. En contre partie il implique la mise en œuvre d'installations complexes travaillant sous vide, des investissements importants et des cycles d'usinage se chiffrant encore en fractions de journées, ce qui en limite l'usage à des productions limitées en quantité ;

De leur côté les USA, à la suite de travaux réalisés à l'Université de Rochester, ont développé une autre technologie de retouches locales basée sur le principe dit de « polissage magnétoréologique » (utilisation d'un jet de liquide chargé de particules abrasives et de particules magnétiques, qui, placé dans un champ magnétique intense, se solidifie partiellement et permet ainsi l'usinage local de la pièce optique amenée en contact). Ces travaux ont conduit à la mise au point puis à la production d'une machine industrielle permettant d'effectuer la phase de rectification finale du profil, après celle de polissage souple. Cette opération est rapide, très déterministe et ne dégrade pas la qualité initiale de rugosité. Bien que le niveau d'investissement reste élevé, cette technologie n'implique pas d'environnement industriel particulier et conduit à des temps d'usinage relativement courts, ce qui permet d'envisager son application à des productions de série.

Ces machines ne sont produites qu'aux USA et en RFA (sous licence pour le marché Européen).

Au moins deux industriels français se sont aujourd'hui dotés de cette technologie (Thalès Angénieux et SESO) et l'utilisent de façon courante en production de série.

Le pôle optique et vision de Saint Etienne a été le premier en France à avoir installé une plateforme de transfert technologique comprenant un ensemble de machines pour l'usinage à la pointe diamant et la micro rectification (de 600 mm de diamètre) et le polissage magnéto-réologique, ainsi que les moyens de contrôle associés.

7.1.2 La problématique de la production des composants optiques pour l'instrumentation en France

Jusqu'à présent la France a toujours essayé de conserver une indépendance dans le domaine de la production des composants optiques tout en s'associant avec ses partenaires Européens ou mondiaux. Ceci lui a permis de développer de solides positions dans des secteurs tels que le spatial, l'aéronautique, l'armement, la recherche, les télécommunications, les optiques professionnelles de prise de vue (zooms), l'instrumentation, etc..., secteurs qui font appel à l'optique et qui nécessitent des capacités industrielles de production.

Pourtant ce domaine de la production des composants optiques est actuellement en danger en France, et il ne reste aujourd'hui que très peu d'entreprises réalisant du polissage. Cinq entreprises, spécialistes de systèmes ou d'équipement optiques complexes, ont des départements ou des filiales disposant d'ateliers de production de composants optiques. Quatre d'entre elles, dont les 2 plus importantes, font partie de grands groupes industriels et n'ont pas fondamentalement vocation à travailler en sous-traitance. Seule la société SESO n'est liée à aucun groupe industriel.

Les autres entreprises de production de composants optiques pour l'instrumentation sont des TPE (dont la plus importante est la société OPTIQUE FICHOU), voir même des TTPE.

Les entreprises du premier groupe, plus ou moins importantes, sont toutes impliquées dans les grands programmes nationaux et européens, ainsi qu'à l'exportation, et ceci depuis de nombreuses années. Que ce soit dans l'astronomie, la défense, l'aéronautique, le spatial, les programmes laser de puissance, elles ont en général une réputation débordant largement le territoire national. Le maintien de leur haut niveau technologique, gage d'un avantage concurrentiel, les contraint à développer, en interne ou en collaboration avec des laboratoires publics, des programmes d'amélioration permanente de leurs processus, et la mise en œuvre de nouveaux principes d'usinage impliquant des plans d'investissement importants à financer.

Toutefois la taille, malgré tout limitée, de ces entités spécialisées, restreint leurs ressources (humaines et financières) en R&D face à certains concurrents étrangers beaucoup plus importants.

Concernant les TPE, qui font largement appel à des processus de polissage classique, elles ont de plus en plus de mal à faire face à la concurrence étrangère, notamment à cause de leur coût de main d'œuvre (qui représente le poste principal de coût dans ce domaine d'activité). De plus ces entreprises n'ont pas la capacité de s'intégrer dans des programmes aidés et ceci freine leur développement. La politique française méconnaît les TPE. Il est par exemple intéressant de noter que, lors de la passation des derniers contrats tri annuels du CNRS portant sur la fourniture de composants, aucune entreprise française n'a été retenue au motif d'une gamme insuffisante de produits. De même la politique d'achat des grands groupes industriels français ne permet que très difficilement à de telles entreprises de s'implanter comme sources d'approvisionnement pour les programmes de série.

Ces entreprises de par leur taille et leurs marchés très concurrentiels, ont beaucoup de difficultés à pouvoir financer et conduire des programmes de développement, ou même simplement d'implantation, de nouveaux processus technologiques.

Ceci fait que le secteur d'activité de l'instrumentation optique de précision pourrait dépendre de plus en plus de l'étranger et que les capacités de production des composants optiques risquent de disparaître à court terme, hormis quelques niches technologiques, plutôt maîtrisées par les entreprises les plus importantes qui peuvent adosser une partie de leur activité à un marché captif (à la condition, toutefois, de savoir rester compétitives)

7.1.3 Les aspects de la formation associés aux processus de polissage

L'enquête menée par l'AFPA, à la demande de Opticsvalley, sur l'adéquation emploi/formation pour le secteur de l'optique a fait apparaître l'existence d'un réel problème au niveau du recrutement des opérateurs en ce qui concerne les activités de polissage des composants optiques.

En effet, les entreprises exigent, lors de leur recherche de personnel, une formation spécialisée en optique (niveau V ou IV), et plébiscitent le BEP qui était dispensé par le lycée Fresnel (Paris) et auraient souhaité un niveau bac professionnel adapté. Le problème actuel devient critique, suite à l'interruption de dispense du BEP en optique par l'Education Nationale et à la méconnaissance, aussi bien par les entreprises que par les candidats potentiels de formation annexes que sont le CQP (certificat de Qualification Professionnelle) d'opérateur en optique développé à l'initiative de l'AFOP (GIFO), qui toutefois ne délivrent pas un diplôme reconnu par l'Education nationale.

La réponse des entreprises concernées par ce problème, bien que très largement insuffisante, consiste à recruter des opérateurs de fabrication ayant des formations initiales en mécanique ou micromécanique et à les former elles même aux métiers de l'optique.

Ce problème critique a conduit la Commission Nationale pour la formation aux métiers de l'Optique et de la Photonique à en faire, dès sa création en 2002, un de ses axes prioritaire de travail. Des enquêtes approfondies ont été menées auprès des entreprises concernées sur leurs besoins, ainsi que sur les compétences demandées, et plusieurs actions ont été lancées. Ces actions concernent la formation des jeunes aux métiers d'opérateurs de polissage et d'opérateurs de montage d'équipements optiques (dont les besoins sont sensiblement plus larges).

On notera que ces actions ont débouché pour l'année scolaire 2003-2004 sur les formations suivantes:

- ## En Ile de France, mise en place d'un CQP d'opérateurs en polissage optique (de niveau V)
- ## A Saint-Etienne, l'ouverture d'une FCIL en alternance "Usineur – Assembleur dans les secteurs de l'Optique". La première année seule l'option "assembleur" a démarré, l'option de Polisseur étant en cours d'approfondissement pour répondre au besoin d'opérateurs sur machines de polissage à commande numérique. Cette formation s'adresse à des titulaires d'un bac professionnel (en productique de préférence)

D'autre part le travail mené au sein de la Commission Paritaire Consultative concernant la part de l'optique dans le nouveau bac pro micro technologies a été poursuivi

Ces différentes enquêtes montrent que le besoin en nombre de nouveaux opérateurs de polissage n'est pas très élevé, mais pérenne, et qu'il va se poser la question, dans les quelques

années qui viennent du remplacement des opérateurs actuels dont la pyramide d'âge a beaucoup vieilli

Elles montrent également que les compétences demandées pour les futurs opérateurs de polissage intègrent les évolutions des technologies industrielles de polissage, ce qui peut conduire à devoir envisager deux niveaux de formations différents (niveau BEP et niveau Bac ou option complémentaire à un Bac Pro)

Le nombre de personnes à former, les moyens à mettre en place, le nombre limité d'enseignants ou d'intervenants professionnels formés à ces techniques particulières, conduira sans doute à concentrer ces formations en un nombre de sites très limités, disposant de préférence dès maintenant d'une partie des ressources, et ceci afin d'éviter les effets négatifs d'une trop grande dispersion

7.1.4 Les techniques de métrologie associées à la production des composants optiques de précision

Le contrôle métrologique des composants en cours et en fin de production font appel à des techniques de plus en plus performantes compte tenu des performances demandées.

Peu de laboratoires publics travaillent sur ce point (IOTA à Orsay, ESPCI à Paris, LAM à Marseille, Ecole des mines de saint Etienne).

Ce domaine de recherche est toujours le parent pauvre et trouve difficilement des financements, tant pour la recherche (peu glorieux et peu sujet à publications) que pour la "routine" (les industriels n'étant pas prêts à payer le coût réel de la métrologie de pointe), et les laboratoires font de la métrologie car ils en ont besoin comme support à d'autres travaux de recherche. Il semble qu'il en soit de même dans les autres pays.

Tous les équipements automatiques de contrôle en production sont importés, surtout des USA

Ceci pose toutefois le problème de la formation associée des opérateurs dont il faut tenir compte, surtout si l'industrie est conduite à faire appel à des formations initiales en mécanique.

On notera également que ce sujet ne passionne pas les étudiants, et qu'il n'est pas forcément intégré dans les programmes des écoles d'ingénieurs (par exemple à l'ESO l'enseignement de la métrologie ne fait plus partie du tronc commun et n'est plus qu'une option).

En conclusion on peut dire que pour que la recherche en métrologie optique serve à quelque chose, il faudra trouver une solution au coût de la métrologie dont l'usage n'est pas assez régulier pour faire l'objet d'un investissement en interne chez de nombreux industriels, ni même pour en faire une activité économique rentable

7.2 Les composants optiques plastiques

(Annexe au chapitre 7.1.3)

Ce document a été réalisé avec la collaboration de Loïc QUERE et Leanirith YEAN (ESSILOR- Centre de recherches) et Guy COURBEBAILLISSE (E.S de plasturgie – Oyonnax)

7.2.1 Introduction

Les matériaux polymères sont utilisés depuis de nombreuses années pour réaliser des composants optiques, et ceci dans trois grands domaines d'applications:

- ## La réalisation de composants optiques pour l'instrumentation et la sécurité (visières, lunettes)
- ## La réalisation de verres correcteurs pour la lunetterie
- ## La réalisation d'éléments optiques pour les systèmes d'éclairage et en particulier pour l'industrie automobile (cf. paragraphe sur les applications non instrumentales)

L'avantage fondamental de ces matériaux réside principalement dans l'utilisation de techniques de production de grande série de la filière plasturgie, ou des techniques de moulage, qui permettent d'obtenir des coûts de réalisation beaucoup plus faibles qu'avec les verres minéraux

Ces techniques de production permettent de réaliser en série des formes qu'il ne serait pas envisageables actuellement de produire en grande quantité avec des verres.

En contrepartie, ces techniques de production, et les qualités intrinsèques des matériaux ne permettent pas d'obtenir le niveau des composants optiques de très haute précision réalisés en verres minéraux. On parlera plutôt en précision de quelques franges et non en fractions de frange.

Enfin les caractéristiques propres de ces matériaux ne permettent pas leur utilisation dans des environnements thermiques élevés et ils sont en général interdits pour des applications sous vide.

Les premiers matériaux polymères, ayant des caractéristiques de transparence, clarté et mécanique permettant d'en envisager l'utilisation pour la production de composants optiques ont été découverts dans les années 1930/40

Les matériaux qui ont réellement débouché industriellement sont les suivants:

- Le PMMA (Polyméthacrylate de méthyle) ou "Plexiglass", dont la transparence est très proche de celle des verres crown. C'est un matériau à caractère thermodurcissable qui se moule (toutefois une diminution de volume de 22% se produit lors de la polymérisation), et qui a une résistance moyenne à la rayure et bonne au choc

- Le CR 39 de PPG (Pittsburg Glass Company). C'est aussi un matériau thermodurcissable qui se moule (avec un retrait volumique de 14%)

Ces deux matériaux sont mis en œuvre par des procédés de coulée suivie de polymérisation

- Le Polycarbonate. C'est un matériau à caractère thermoplastique permettant la transformation de ces polymères par injection, par contre ils résistent peu aux rayures et aux solvants

7.2.2 Les composants pour l'instrumentation et la sécurité

7.2.2.1 La position française

La réalisation de composants optiques à partir de matériaux plastiques existe depuis une quarantaine d'années. Toutefois la réalisation de composants présentant une qualité optique suffisante pour être utilisés dans les équipements optiques (en terme d'aberrations optiques résiduelles, de qualité de surface, ...) implique une maîtrise particulière des procédés de production par injection et de la réalisation des moules

C'est ce qui fait qu'en France, seules deux entreprises se sont spécialisées dans la production de série des composants optiques en plastique de précision.

Il s'agit des sociétés GAGGIONNE (lentilles de Fresnel – lentilles asphériques – réalisation d'optiques spéciales moulées en PMMA et en PC) et de SAVIMEX (composants et lentilles en plastique – composants asphériques et diffractifs – injection de visières de casque – injection, traitement et assemblages de pièces en matières plastiques). Cette dernière entreprise a réalisé de nombreux composants spéciaux utilisés dans des équipements aéronautiques de défense.

Il faut noter que le nombre limité de matériaux plastiques pouvant être injectés et ayant de bonnes caractéristiques optiques (indice de réfraction et constringence) et en terme de transmission, transparence, absence de coloration, etc.... réduit les possibilités de calculer des systèmes optiques complexes, et que la présence d'un certain nombre de bandes d'absorption peut également limiter les domaines spectraux d'application

7.2.2.2 les axes de développement

Les sauts technologiques dans le domaine des composants optiques plastiques sont à rechercher dans les deux axes suivants:

- la synthèse de nouvelles molécules permettant d'élargir le domaine des indices et des dispersions spectrales accessibles, tout en conservant de bonnes caractéristiques de transparence, homogénéité et clarté.

- Une des difficultés réside dans le faible tonnage de matière utilisé par les entreprises spécialisées en optique qui n'intéresse pas les industriels de la chimie organique en France et en Europe, d'autant plus que la France dispose pas d'industrie de production de série pour la production des optiques de lecture/écriture des différents supports multimédias: CD, CD-R, DVD, etc... qui ont été à la base des progrès technologiques réalisés dans le domaine de l'injection et du développement du polycarbonate pour l'optique.

Les progrès viennent principalement du Japon, comme on le verra pour les verres organiques pour la lunetterie (avec les risques de retard par rapport à la concurrence générés par la lourdeur des procédures Européennes d'autorisation d'importation de nouvelles molécules)

L'utilisation de nouveaux moyens d'usinage optiques ou mécaniques de très haute précision pour l'usinage direct à partir d'ébauches en résines thermodurcissables, ou pour la réalisation des moules d'injection pour les résines thermoplastiques. L'application des techniques d'usinage à la pointe diamant permet maintenant de réaliser, en production de série, des composants asphéro-diffractifs dans le spectre visible, ce qui n'était pas envisageable il y a encore quelques années. Les travaux de développement réalisés par les entreprises françaises

permettent maintenant de disposer de types de composants qu'il n'est pas possible de réaliser en verre. Les possibilités des nouvelles techniques de polissage optique, permettant d'aborder des surfaces asphériques, devront être approfondies pour leurs applications à l'usinage de formes complexes pour les moules d'injection.

7.2.3 Les "verres organiques pour l'ophtalmologie"

7.2.3.1 historique et position de la France

La réalisation, de façon maîtrisée, des premiers verres de puissance par procédé de coulage suivi d'une polymérisation est assez récente, et a été réalisée en France. La difficulté venant du retrait volumique important en phase de polymérisation et de la difficulté à réaliser des moules dont les parois suivent ce retrait tout en conservant une qualité optique irréprochable.

Ce n'est donc que depuis 30 ans que l'on a connu un réel essor des verres organiques, dont le leader mondial reste la société ESSILOR.

7.2.3.2 Les évolutions récentes des matériaux organiques

Depuis 1980 s'est développée une intense activité de R&D concernant la mise au point de matériaux plus "performants" aussi bien pour le porteur des verres que pour le fabricant et pour l'opticien.

Les paramètres de performance à prendre en compte sont :

Pour le porteur

- Plus esthétiques, donc le plus mince possible, ce qui entraîne un besoin en indice de réfraction n plus élevé
- Plus confortables, donc le plus léger possible, ce qui entraîne aussi un besoin en fort indice, mais également en faible densité massique
- Plus transparents, incolores et sans diffusion, ce qui entraîne une faible dispersion chromatique (et donc une forte constringence γ)
- Plus résistant à la rayure, ce qui entraîne la mise au point de nouveaux vernis durcisseurs
- Plus sûrs, ce qui signifie une bonne résistance aux chocs et une protection accrue contre le rayonnement UV

Pour le fabricant et l'opticien

- Les procédés de mise en œuvre et de finition doivent présenter une innocuité totale

Il faut donc rechercher des compromis entre l'ensemble de ces paramètres en tenant compte en plus d'un impératif de prix de revient raisonnable.

a) Les progrès réalisés pour les résines thermodurcissables

Les recherches se sont d'abord portées sur l'élévation de l'indice de réfraction.

Ce sont surtout des sociétés chimiques Japonaises qui ont permis les progrès réalisés dans ce domaine. En partant de matériaux d'indice $n=1,5$, de constringence $\gamma=58$ et de densité $d=1,2$, on est passé à des indices de 1,6 puis 1,67, puis 1,7 et maintenant de 1,74, sans que l'on atteigne une gamme d'indice et surtout de dispersion aussi importante qu'avec les verres minéraux. De plus la densité du matériau est directement liée à l'indice de réfraction et à la dispersion chromatique.

Dans les années 1990 ont été mis au point des matériaux permettant d'obtenir des "hauts indices" ($n = 1,59 - 1,6$; z variant de 30 à 40 et d variant de 1,3 à 1,4) par introduction dans les formules de base d'atomes de soufre se substituant à des atomes d'oxygène.

Il est maintenant possible de disposer de matériaux de "très haut indice" ($n = 1,67$ à $1,75$; z variant de 32 à 28 et d variant de 1,3 à 1,45)

b) Les progrès réalisés pour les résines thermoplastiques

Les progrès réalisés depuis les années 1980 dans le domaine des vernis comme revêtement de protection aux rayures et aux solvants des verres injectés ont permis d'utiliser ces résines pour la réalisation en série de verres de lunettes, ce qui n'était pas possible auparavant compte tenu de leur fragilité

Le seul matériau thermoplastique transparent utilisé dans ce secteur d'activité reste le polycarbonate qui dispose d'un haut indice de réfraction ($n = 1,59$), une densité faible ($d = 1,2$) et est très résistant au choc

c) Les autres progrès réalisés dans l'axe matériaux

Pour aller encore plus loin dans les travaux de R&D, il a été nécessaire de considérer le verre ophtalmique comme un système complexe comprenant le substrat en matériau polymère, revêtu d'une superposition de couches minces ayant chacune une fonction bien spécifique: adhésion et (ou) résistance aux chocs, anti-abrasion, coloration, photochromique, absorption des UV, anti-reflet, anti-salissure, etc...

C'est dans le cadre de cette approche globale qu'il n'est pas interdit de penser que les verres de lunettes pourront également devenir des verres intelligents

C'est aussi dans le cadre de cette approche globale que les apports de la R&D de différents secteurs de l'optique ou les laboratoires français disposent d'un potentiel important, tels que les couches minces, les matériaux sol gels, les technologies de micro structuration, ou les matériaux ayant des effets optiques particuliers, peuvent permettre d'apporter à ce secteur industriel, où la France dispose d'une très forte position industrielle, de nouvelles offres basées sur de nouveaux sauts technologiques ce qui lui conférerait un avantage concurrentiel indéniable

7.2.3.3 Les évolutions des procédés de réalisation d'un verre fini

Les verres organiques réalisés à partir de surface de révolution et destinés à la correction des amétropies ont été les premiers à être réalisés par moulage simultané des deux faces, permettant ainsi d'obtenir directement le produit fini

Par contre la réalisation des surfaces progressives destinées à la correction de la presbytie est plus récente. Elle implique la réalisation d'un semi fini progressif par moulage d'une des faces en usine de production, et en une phase d'usinage et de polissage de l'autre face pour obtenir les propriétés optiques, suivi des traitements (vernis + A.R+... Cette deuxième étape est réalisée dans des laboratoires de prescription plus proches du client final

Ces dernières années on a vu apparaître sur le marché un nouveau type de verres progressifs réalisés par une technologie dite par "usinage direct" qui consiste à réaliser des surfaces complexes par usinage (usinage de type usinage pointe diamant) suivi par un polissage de la surface au palet organique; Cette technique permet de mieux répartir les corrections entre les deux faces du verre.

Enfin on commence à voir apparaître l'utilisation des procédés de moulage rapide (voir le paragraphe sur la stéréolithographie) qui permettent (pour une gamme réduite, actuellement, de correction et de matière) de réaliser directement un verre fini progressif et cela au plus près des marchés (dans un laboratoire de prescription ou même directement chez l'opticien)

7.2.3.4 Les évolutions des technologies de réalisation des moules progressifs

Les moules en verre peuvent être réalisés, par une technique de copiage, par affaissement gravitaire au four, sur une surface de céramique préalablement usinée à la forme requise; Depuis les années 1990, les performances des machines à commande numérique permettent de réaliser les moules par usinage direct, mais le point dur reste l'aspect déformant du polissage final.

Pour les moules en métal on peut soit faire croître un dépôt électrochimique de nickel sur une anode ayant la forme adéquate, soit usiner avec des outils à pointe diamant des matériaux tendres (dépôt de nickel par exemple) soit rectifier des matériaux plus durs comme l'acier, mais il faudra alors conserver une étape finale de polissage, avec les mêmes problèmes que ci-dessus

7.2.4 Les problèmes d'approvisionnement des matériaux polymères

Ce secteur est très sensible aux contraintes d'accès à de nouvelles molécules, compte tenu des règles imposées à leur entrée dans les pays de la communauté européenne, qui entraînent des tests longs et coûteux. Ces directives donnent un avantage certain à des concurrents n'ayant pas les mêmes contraintes et qui gagnent un temps précieux pour le développement et l'industrialisation de nouveaux produits.

7.3 Les matériaux pour l'instrumentation optique

(Annexe au chapitre 7.1.2)

Ce document a été réalisé avec la collaboration de Jean-Jacques CONTET (Optique Fichou – Pdt AFOP), Alain-Pierre LILOT (Saint Gobain – Division cristaux et détecteurs) et Dominique LAROCHE

7.3.1 Les verres Optiques

Il n'y a plus, à priori, en France de R et D dans le domaine des verres optiques classiques pour l'optique instrumentale. (Cette activité était jusqu'à présent menée par les laboratoires industriels)

Par contre le problème de l'approvisionnement des verres optiques devient de plus en plus critique (en particulier pour les TPE françaises) pour d'autres raisons:

- Diminution du nombre de fournisseurs disposant d'un catalogue de verre complet
- Arrêt programmé de la production de certains types de verres

a) Diminution du nombre de verres

En effet la société Corning, qui était le seul producteur implanté en France, a cessé sa production de verres pour l'optique instrumentale.

La société allemande Schott (seul producteur disposant d'un catalogue complet restant implanté en Europe), à laquelle les industriels français faisaient également largement appel, disposant de plus en plus d'un monopole et souhaitant également se positionner dans le secteur de la production de composants, impose des coûts et surtout des conditions d'approvisionnement (en particulier sur les volumes minimum et les délais) difficilement accessibles aux TPE, les contraignant à passer par des circuits d'approvisionnement complexes.

En contre partie, les producteurs Japonais, et plus particulièrement la société OHARA, avaient mis en place, depuis quelques années, une politique de vente de leurs produits en Europe, permettant un accès beaucoup plus facile aux différents verres de leurs catalogues (relativement complet et voisin de celui de Schott). Les entreprises optiques françaises font maintenant de plus en plus appel à eux.

b) Arrêt de la production de certains types de verres

La production de certains types de verres optiques pose des problèmes qui vont rapidement devenir critiques pour les industriels.

Ces problèmes concernent les verres dopés aux métaux lourds, tels que le plomb, dont l'emploi va être interdit suite à la mise en place de directives liées à l'hygiène et à la sécurité des travailleurs. En conséquence la production de ces verres va devoir être arrêtée en Europe, puis vraisemblablement ensuite au Japon.

Les fabricants de verres travaillent depuis plusieurs années à la mise au point de verres de remplacement, sans qu'il ne soit toutefois toujours possible d'obtenir des caractéristiques identiques, en particulier en ce qui concerne la dispersion.

La disparition de certains verres imposera aux producteurs de systèmes optiques de modifier leurs formules optiques pour s'adapter à ces nouveaux produits qui ne sont pas directement interchangeables, au risque pour certains systèmes travaillant dans des bandes spectrales très large de devoir aller jusqu'à ajouter des composants supplémentaires.

Les adaptations des dossiers, d'outillages de production et les modifications de la mécanique d'assemblage générés par ces changements de verres auront obligatoirement des répercussions sur les coûts de réalisation.

7.3.2 Les verres non conventionnels, les cristaux et les céramiques

Nous n'aborderons dans ce chapitre que les matériaux utilisés pour leur capacité à répondre à des fonctions optiques passives.

La R&D, pour ces catégories de matériaux, est menée dans un certains nombres de laboratoires publics ou privés. Elle concerne aussi bien l'élaboration des compositions, que leur caractérisation et l'étude de la mise en forme de ces matériaux

Parmi les développements les plus représentatifs, par leurs applications industrielles (effective ou potentielle), de ces dernières années on peut repérer plusieurs axes:

- Les nouveaux "verres infrarouges"
- Les céramiques comme substrats de miroirs
- Les matériaux à gradient d'indice
- Les cristaux pour l'instrumentation optique

a) Les nouveaux "verres infrarouges"

Dans le domaine des verres non conventionnels pour l'infrarouge les travaux du laboratoire « verres et céramiques » de l'université de Rennes sur les verres à chalcogénures, ont porté sur 2 axes principaux :

- Les lentilles pour caméras thermiques (ces verres couvrent un spectre très large allant du visible à l'IR (10 à 20 μ)). Dans ce domaine, les travaux de mise au point d'une technique de moulage du matériau GASIR ont été conduits par la société Vertex S.A (devenue filiale du groupe belge UMICORE-IR-Glass, producteur entre autre de germanium optique et de ZnSe). Ce matériau, qui se moule, se prête bien à de la production de série. Ce procédé de mise en forme peut permettre de réaliser des surfaces asphériques et vraisemblablement diffractives ce qui est indispensables pour les corrections chromatiques

- Les fibres pour guidage de lumière IR, avec la mise au point en laboratoire d'une méthode d'obtention de fibres double indices destinées à des capteurs optiques à fibres.

b) Les céramiques

Parmi celles-ci, le carbure de silicium (SiC) est de plus en plus couramment utilisé, pour ses propriétés mécaniques et thermiques, comme substrat de miroirs en particulier dans les applications spatiales ou aéronautiques.

Plusieurs industriels en maîtrisent bien les process de mise en forme mécanique, de polissage et de traitements optiques.

Des laboratoires universitaires, en particulier à limoges, conduisent des travaux de recherche sur les céramiques.

c) *les matériaux à gradients d'indice (GRIN)*

La recherche permanente menée par les industriels, de disposer d verres spéciaux leur ouvrant la possibilité de calculer des systèmes optiques permettant de réduire le nombre des composants (et donc la taille, le poids et le coût des équipements), fait de plus en plus apparaître l'intérêt des matériaux à gradients d'indice et surtout pour ceux ayant un gradient axial.

Quelques matériaux, produits par une entreprise américaine, existent commercialement, mais leur qualité et les faibles dimensions accessibles, ne permettent pas d'envisager leur utilisation pour la plupart des applications dans le secteur de l'instrumentation optique de précision.

Il semble qu'aucun laboratoire de recherche français (public ou privé) ne mène des travaux de R&D sur de tels matériaux, qui correspondent pourtant à un réel besoin industriel. Seul le laboratoire TSI de Saint-Etienne conduit quelques investigations dans cet axe, mais en ne disposant d'aucunes des ressources nécessaires pour pouvoir envisager de faire des progrès suffisants, permettant de conduire à un réel saut technologique donnant ensuite à l'industrie française un avantage concurrentiel certain.

d) *Les cristaux pour l'instrumentation optique*

Le groupe Saint-Gobain est un producteur important d'une large gamme de cristaux pour l'optique, et en particulier de cristaux saphirs et fluorures (CaF_2 , BaF_2 , LiF , etc. ...) utilisés pour la réalisation de composants optiques par transmission.

Le CaF_2 présente pour les concepteurs optiques des caractéristiques spectrales particulièrement intéressantes dans l'UV et l'UV lointain. Ce matériau présente peu de phénomène de vieillissement au flux lumineux. Toutefois des efforts de développement significatifs restent à réaliser pour respecter les spécifications de la micro lithographie (mais la situation est la même chez tous les producteurs de CaF_2), ainsi que pour améliorer les rendements en production encore insuffisants pour satisfaire le marché correspondant.

Dans le cadre de l'organisation de ce groupe, les activités de cristaux (actifs pour détecteurs et sources de photons ou passifs) sont regroupées au sein d'une division Cristaux et détecteurs dont la répartition de la production entre la France (25% en moyenne) et les USA (75%) dépend des matériaux :

- La totalité de la production des cristaux pour l'optique de transmission est faite aux USA

- Matériaux pour laser et optique non linéaire : principalement cristaux YAG dopés Nd et accessoirement YAG dopé Cr, th, ..., Titane saphir, Rubis et KDP. La production est réalisée essentiellement aux USA à l'exception du KDP produit en France.

- Cristaux pour scintillateurs : Principalement NaI, CsI, BGO, CdWO_4 , LYSO. Ces matériaux sont produits à 65%aux USA et à 35% en France

- Wafers pour « blue LED » : ces wafers sont principalement en saphir et la production est faite uniquement aux USA

- Wafers pour isolateurs optiques : il s'agit principalement de Wafers de grenat. La production est faite uniquement en France

- Cristaux pour optique X : multitude de cristaux divers, souvent de type cristaux organiques, qui sont produits uniquement en France

Une deuxième entreprise française, RSA LE RUBIS, est également l'un des leaders dans le domaine de la fabrication de monocristaux de saphir, en particulier pour l'optique dans l'IR, le

visible et l'UV. Cette entreprise à une activité export importante vers l'Europe, l'Asie et l'Amérique du nord

Depuis quatre ans cette entreprise a entrepris, au delà du classique procédé Verneuil, de développer industriellement de nouveaux procédés de production du saphir (EFG et procédé Bagdasanov) afin d'élargir son offre.

En conclusion, il semble que de façon générale l'approvisionnement concernant les cristaux optiques, comme celui des matériaux infra rouges et les céramiques, ne pose pas de problèmes particuliers aux industriels. On peut toutefois noter une dépendance très forte de l'industrie française vis-à-vis de l'étranger et plus particulièrement des USA avec localement quelques difficultés d'accès à certains matériaux. On peut remarquer que dans ces différents domaines aussi, et malgré une recherche souvent en pointe, la France a beaucoup de mal à développer ensuite un outil de production sécurisé permettant de répondre aux besoins en matériaux critiques de ses industriels

Il est donc indispensable de réfléchir à la question suivante:

N'est il pas dangereux de dépendre de l'étranger pour l'approvisionnement des matériaux optiques critiques nécessaires à la réalisation de systèmes spatiaux ou de défense, car l'accès à certains de ces matériaux peut être bloqué, du jour au lendemain, sans préavis et sans recours possible?

7.4 Les procédés de production et les matériaux pour les applications non instrumentales

(Annexe au chapitre 7.1.5)

Ce document a été réalisé avec la collaboration de Hervé ARRIBART (Saint Gobain Recherche)

Le verre est un matériau qui a aussi de nombreuses applications dans des domaines différents de l'instrumentation optique, intéressants le grand public et qui génèrent très souvent des productions industrielles importantes.

Ces produits, qui au départ avaient des caractéristiques relativement simples, évoluent beaucoup, depuis quelques années, en fonction de nouvelles attentes du marché. Ces évolutions portent aussi bien sur l'introduction de nouvelles fonctionnalités que sur des problèmes de nature esthétique. La résolution pratique de ces nouvelles attentes implique, en fait, des travaux importants de R&D, que ce soit au niveau :

##Des matériaux.

##Des techniques de traitement de surface.

##des techniques d'instrumentation de contrôle.

##De l'utilisation de process de découpe ou d'assemblage (cf. l'utilisation des lasers comme procédés de production)

Ces travaux font appel à un certain nombre de technologies de pointe, dont certaines sont également utilisées en optique instrumentale.

7.4.1 Les secteurs d'activité

Les secteurs d'application concernent en particulier le bâtiment, l'automobile, l'électroménager, etc... mais également des secteurs industriels moins connus tels que le flaconnage en particulier pour les produits de luxe (le domaine des verres pour écrans d'équipements de visualisation (tubes TV, écrans LCD, etc...) n'est pas abordés dans ce chapitre). Dans ces secteurs la France occupe une position industrielle solide due en particulier, mais pas uniquement, au groupe Saint-Gobain (qui dispose en France d'un important centre de recherche)

7.4.2 Les évolutions dans le domaine des matériaux

L'évolution des marchés du verre pour l'automobile (vitres, pare brise, ...) implique la recherche de nouvelles couleurs, aussi bien pour l'amélioration des caractéristiques anti-solaires que pour des problèmes de nature esthétique demandés par la clientèle.

Les axes de recherche portent entre autres sur l'introduction de nano particules dans le matériau de base.

Pour les effets anti-solaires, il y a un intérêt pour des matériaux colorés qui, vus de l'extérieur, présentent un très faible facteur de réflexion. Il faut donc imaginer de nouveaux axes de recherche.

Dans le domaine des blocs d'éclairage automobiles, et plus particulièrement des phares, la mise au point de nouveaux matériaux plastiques ayant de bonnes qualités optiques permet de réaliser des systèmes optiques complexes de façon plus économique qu'avec du verre, ce qui implique une reconversion chez certains industriels.

L'industrie du flaconnage est également intéressée par des matériaux présentant de nouvelles couleurs, mais dans le cas du flaconnage pour les produits de luxe, il s'y rajoute une recherche de nouveaux aspects optiques sophistiqués, ceci dans un but de différenciation entre marques. Ceci conduit à envisager des matériaux structurés à des niveaux de la longueur d'onde en surface ou en interne.

Ces axes de recherche nécessitent des outils de modélisation des matériaux structurés de plus en plus sophistiqués.

Les travaux de recherche sur de nouveaux codes de modélisation sont menés dans les centres de recherche des grandes entreprises industrielles, qui travaillent en étroite collaboration avec des laboratoires universitaires et plus particulièrement le Laboratoire d'Optique des Solides de Paris 6 (Jacques Lafait)

7.4.3 Les évolutions au niveau des traitements de surface par dépôt de couches minces

Initialement les dépôts de couches minces optiques ont été utilisés pour résoudre des problèmes de transfert thermique appliqués au bâtiment ou à l'automobile. Les couches minces sont maintenant utilisées pour des applications de plus en plus nombreuses, et permettent de répondre à un besoin de nouvelles fonctionnalités. Les dépôts réalisés industriellement sont de plus en plus complexes (> 20 couches) et les effets recherchés couvrent les domaines du visible et de l'infrarouge, avec des contraintes spécifiques telles que ces empilements ne doivent pas présenter d'effets colorés

Si les processus de production actuels sont classiques, les besoins en R et D portent sur le développement de codes de calcul appropriés et au développement d'outils de prototypage virtuel.

Les nouvelles technologies de dépôts de couches sol gels ne sont pas actuellement envisagées industriellement pour remplacer les technologies actuelles dont les processus sont parfaitement rodés. Elles ne pourront trouver des débouchés que si elles permettent d'apporter de nouvelles fonctionnalités spécifiques aux caractéristiques des matériaux sol gels, ce qui pourrait, par exemple, être le cas dans des domaines tels que la micro ou nano structuration de surface, l'obtention d'effets colorés ou d'irisation, etc.....

7.4.4 Les développements dans le domaine des vitrages actifs

L'utilisation de couches polymères permettant de maintenir en suspension des particules de cristaux liquides permet de proposer de nouveaux produits

Les effets électrochromes, permettant de passer d'un état transparent à un état coloré absorbant (bleu), vont pouvoir trouver des débouchés dans les toits pour automobile; Mais il sera nécessaire de développer de nouveaux matériaux permettant d'obtenir d'autres effets colorés

Les recherches industrielles sont nombreuses dans ce domaine des vitrages actifs

7.4.5 Les verres permettant de rediriger la lumière

Les technologies de structuration à échelle millimétrique permettent de développer de nouveaux produits offrant des caractéristiques originales pour l'obtention d'un meilleur éclairage à l'intérieur des bâtiments

7.4.6 Les évolutions dans les besoins en instrumentation de contrôle

Les laboratoires des groupes impliqués dans ces secteurs industriels font un appel important aux technologies optiques pour développer les nouveaux moyens de contrôle (de laboratoire ou sur les chaînes de production) nécessaires à leurs activités.

Ces développements ne doivent pas uniquement se limiter à la mesure de certaines caractéristiques physiques des nouveaux matériaux, mais il devient aussi important de pouvoir effectuer des analyses de sensations

7.5 Les couches minces optiques

(Annexe au chapitre 7.1.4)

Ce document a été réalisé avec la collaboration des experts suivants: Marie-France RAVET (IOTA – Orsay), Claude AMRA (Institut Fresnel – Marseille), Jean-Marie MACKOWSKI (INP – Lyon) et Guillaume RAVEL (CEA/LETI/IPC – Grenoble).

La méthode de travail retenue a été de se baser sur un questionnaire. Les réponses sont synthétisées dans ce document, ainsi que les principales recommandations.

7.5.1 Introduction

Les couches minces optiques ont pour effet de transformer les caractéristiques de base du substrat sur lequel elles sont déposées. Les fonctionnalités qu'elles apportent sont très variées (anti-reflet, miroir, filtrage, séparateur spectral,...) et ce sont elles qui donnent au composant optique ses vraies caractéristiques opérationnelles.

Les couches minces permettent de "rendre intelligente" une surface, ce qui fait que leur usage s'accroît naturellement, et donc le besoin de Ret D pour les technologies associées est toujours fort, sinon croissant

C'est pourquoi, de façon générale, les couches minces sont une activité stratégique pour nombre d'applications et de marchés du domaine de l'optique, et qu'il est indispensable que ce secteur dispose d'un potentiel d'innovation pour s'adapter en permanence aux nouveaux domaines spectraux (UV et EUV), à de nouveaux marchés (télécommunications, ...), à de nouveaux matériaux et, de plus en plus, à des environnements de plus en plus sévères (températures, vide, irradiations, flux lumineux intenses, flux lasers à très haute énergie, ...). Mais simultanément à cet usage croissant, les composants laissent la place aux systèmes, et la couche mince devient de moins en moins visible, car enfouie dans plusieurs niveaux de sous-traitance (que ce soit au niveau de l'étude que de la production).

Ceci conduit au paradoxe suivant:

on n'a jamais eu autant besoin de la couche mince, et pourtant il est très difficile de financer une activité de recherche sur un problème de couches minces (on retrouve une situation similaire à celle rencontrée dans le domaine des matériaux/cristaux il y a quelques années)

7.5.2 La position actuelle de la recherche en France

Vue de l'extérieur, La communauté française des couches minces apparaît comme peu structurée et peu reconnue. De plus le nombre d'acteur français est réduit et tous ne sont pas concernés (ou équipés pour) par les problèmes d'innovation. Cette vision est sûrement liée au fait que les Couches minces sont très souvent perçues comme une technologie de sous-traitance avec un faible potentiel d'innovation (on limite trop souvent leurs fonctionnalités aux antireflets ou au filtrage spectral).

La conséquence en est que du point de vue académique, cette filière n'apparaît pas comme une priorité et en conséquence elle ne bénéficie que de peu de soutien.

7.5.2.1 la recherche dans le secteur public

La réalité est cependant totalement à l'opposé de cette vision extérieure, et les grands programmes ont été et restent toujours salutaires au développement de cette filière technologique. En effet ils permettent de faire apparaître des liens directs entre les performances du dispositif et celles d'un ensemble de couches minces

De nombreux exemples peuvent être donnés, que ce soit dans la mise au point des anti-reflets infra rouge devant travailler dans des ambiances très sévères associées aux équipements aéronautiques de défense, des couches DLC (amélioration de la tenue à la pluvio-érosion, tribologie,...), des performances de tenue aux flux laser sur certains composants des programmes de la DGA puis pour la chaîne de transport du flux du programme Mégajoule (des seuils d'endommagements laser supérieurs à 100 Joules/cm² (impulsions de 3 ns) ont été obtenues pour des fonctions miroirs), que ce soit le respect des performances exigées par le cahier des charges du programme VIRGO avec la mise au point de couches ayant des niveaux d'absorption ou de diffusion inégalées au monde à ce jour, ou encore les avancées dans les process de dépôts par pulvérisation ionique ou par pulvérisation cathodique magnétron réalisés pour les applications en lithographie EUV grâce au programme PREUVE, sans oublier les innovations liées à l'apparition des couches minces sol gel dans le cadre du programme mégajoule....;

Toutefois, la recherche en couches minces se concentre en un nombre très restreints de laboratoires universitaires ou d'écoles d'ingénieurs, et dans quelques laboratoires de grands organismes publics (en particulier le CEA).

Les comparaisons qui peuvent être faites au travers des congrès, publications, etc... concernant le niveau de la recherche française vis-à-vis d'autres pays ne montrent pas de déséquilibre flagrant; il y a tout au plus certaines distributions géographiques (ex: une force spécifique des Allemands dans l'ultra-violet)

7.5.2.2 La recherche dans le secteur privé

Du point de vue industriel, les principales entreprises françaises disposant de moyens de productions de composants optiques de haute technicité sont également dotées de services couches minces, souvent de très haut niveau.

Ces services ont avant tout vocation de développer et de réaliser les couches spécifiques aux besoins propres de l'entreprise et n'ont donc qu'une activité de sous- traitance externe limitée (surtout en R&D)

Or, dans le domaine des couches minces, la recherche est essentiellement pilotée par des activités militaires ou spatiales, beaucoup plus que par des applications grand public. Les financements liés à ces types de marché, et leurs contraintes de confidentialité, ont fait que les équipes de recherche industrielles sont relativement autosuffisantes, ce qui ne favorise pas un cheminement classique de l'amont vers l'aval, des laboratoires de recherche vers les industriels.

Les habitudes de travail, acquises dans le passé (en partie pour les motifs exposés ci-dessus), ne semblent pas toujours propices au décloisonnement de la R&D et à une collaboration entre laboratoires de recherche publics et industriels

Un deuxième aspect, qui découle directement de la constatation précédente, est que les laboratoires publics sont presque en situation de concurrence avec les équipes de R&D des groupes industriels. Le système perd ainsi beaucoup en efficacité

Enfin les niveaux de prise de risques de l'industrie, dans le domaine des couches minces, semble être inférieur à ce qui se pratique dans d'autres secteurs technologiques. Il semble qu'il soit difficile pour certaines équipes de recherche de vendre leur R&D, qui comporte toujours un certain niveau de risques alors qu'il n'y a pas toujours un profit au bout du chemin.

Toutefois l'enquête menée auprès des principaux laboratoires publics de couches minces, fait apparaître que malgré les difficultés existantes (souvent liées à des raisons historiques), les relations existent entre ces laboratoires publics et les laboratoires de couches minces industriels.

Les transferts de technologie se réalisent depuis de nombreuses années dans le domaine des antireflets IR (3-12 μ) prévus pour travailler dans les environnements sévères du champ de bataille, dans le domaine de dépôts PVD de couches minces ayant des seuils d'endommagement au flux laser à 1.06 μ très élevés, et vers les PME

Enfin les activités classiques de sous-traitance de couches minces optiques sont en général réalisées, pour des raisons de coût, dans des PME ou des TPE spécialisées.

En général ces entreprises ne disposent pas des moyens d'investir dans des programmes d'innovations technologiques, qui impliquent, dans ce domaine, des investissements lourds en matériel et en ressources humaines hautement qualifiées.

Une exception importante concerne la société HEF (Saint Etienne) qui non seulement à une activité importante dans le domaine des couches minces sur matériaux plastiques par des techniques de pulvérisation cathodique, mais qui a également une activité importante de développement et de production de machines spéciales de dépôts par pulvérisation cathodique pour l'industrie. Elle collabore également avec le LTSI dans des recherches sur le dépôt de couches DLC ("Diamond Like Carbon") au moyen de laser à impulsions ultra brèves.

7.5.3 Les axes de développement pour les années à venir

poursuite des développements autour des process énergétiques: faisceaux d'ions, CVD Plasma, pulvérisation RF, ...

Amélioration des performances en ce qui concerne l'absorption résiduelle des couches minces optiques

Développement de nouveaux matériaux avec des facteurs de "qualité mécanique" élevés

Couches IR sur matériaux moulables adaptées aux caméras IR bas coûts

Composants pour télécoms

Amélioration de la tenue aux flux laser et des seuils d'endommagement laser

Amélioration de l'uniformité des dépôts

Microsphères multicouches

Association aux cristaux photoniques

De plus les développements dans le secteur des matériaux sol gels, avec leurs fonctionnalités spécifiques liées à la structure de ces matériaux, et de leurs applications aux couches minces optiques devront être soutenus et développés, car ils seront sûrement à la base de sauts technologiques procurant des avantages concurrentiels certains à ceux qui en

disposeront. Ces développements passeront obligatoirement par la création d'équipes pluridisciplinaires en optique et en chimie.

En ce qui concerne le domaine spectral des EUV, il existe un enjeu économique important associé à la lithographie XUV, qui est encore en phase de pré développement.

Les travaux de recherche en couches minces portent sur les traitements des masques et sur les traitements des couches réfléchives (augmentation du nombre de couches, amélioration des contrôles des épaisseurs des couches et de leur uniformité, utilisation de la pulvérisation réactive, ...). Ils sont, en particulier, orientés sur l'obtention du "zéro défaut", sur l'amélioration de la stabilité des couches sous flux et le contrôle des contraintes, ce qui implique une optimisation multi-critères à mettre en œuvre là où par le passé on n'optimisait qu'un seul paramètre (réflexion, ...)

Toutefois les travaux de recherche menés dans ce domaine spectral ne doivent pas se limiter à cette seule application, mais doivent également être menés pour adjoindre des optiques spécifiques et performantes aux nouvelles sources de rayon X, pour la métrologie XUV, pour les projets spatiaux d'observation de la couronne solaire, ainsi que pour le diagnostic des plasmas chauds

7.5.4 Recommandations

Pour le transfert en ligne entre les laboratoires de recherche publics et les entreprises, les bourses cofinancées CNRS- Industrie sont un excellent vecteur, non seulement de transfert de connaissances, mais également de rapprochement entre recherche publique et laboratoires industriels.

Le système (par rapport au composant) trouvera toujours des financements à un niveau industriel et européen, et la tendance lourde actuelle amplifie ce déséquilibre au profit des études systèmes. Les financements du Ministère devraient donc idéalement rééquilibrer cette situation: Il est quasi-impossible de décrocher un programme d'études sur une problématique couches minces, alors même que leur emploi rend la fiabilité du système dépendante de la performance couches minces.

La communauté Couches minces souffre d'un manque de structuration/lisibilité qui freine les collaborations et l'innovation. Une solution à ce contexte peut consister à créer un groupement de recherche spécifique (type GDR couches minces) qui réunirait plusieurs fois par an tous les acteurs du domaine (industriels et académiques) et procéderait à des appels d'offre nationaux (type ACI, AS, ACO, EPML....). Ce GDR aurait de plus l'avantage de conférer de la reconnaissance à la thématique, qui ne serait pas systématiquement obligée de se tourner vers l'international.

Par ailleurs, des centrales technologiques de premier ou deuxième rang (au sens MEN) pourraient être rapidement déclarées, compte tenu du potentiel unique existant chez certains acteurs français.

A titre d'exemple, on peut noter, que des mesures incitatives prises conjointement par les collectivités territoriales et les organismes de tutelle ont permis de soutenir la mise en place de la "centrale d'élaboration et de Métrologie d'Optique X d'Orsay". Cette centrale de fabrication et de calibration des optiques X et UV sera mise à la disposition des laboratoires et des industriels impliqués dans les études et applications dans ce domaine. La centrale rentre actuellement dans sa phase finale et les premiers résultats obtenus sont très satisfaisants.

7.6
RAPPORT SUR
L'OFFRE DE L'OPTIQUE
DANS LES
PROCEDES DE FABRICATION

(annexe au chapitre 7.2)

(Rédigé par le "club Laser et Procédés)

groupe de travail: Rémy FABBRO (CLFA)
Wolfgang KNAPP (CLFA)
Jacky PORTRAT (BT/PCLB)
Eric FOGARASSY (IREPA LASER)
John LOPEZ (CELIA – PALA) – *coordinateur*
François Salin (CELIA – PALA) - *membre invité*

OBJET DE LA DEMANDE :

Le ministère de la Recherche souhaite dresser un bilan national de l'Optique et de la Photonique en France, précisant les forces et les faiblesses. Ce Livre Blanc doit développer les quatre points suivants :

- Un état actuel des recherches académiques dans le domaine, avec une description des grandes orientations pour le futur ;
- Une analyse comparable relative à l'Industrie de l'Optique et à la recherche industrielle qui lui est liée ;
- Une présentation des formations existantes et des emplois et besoins attendus par le tissu industriel ;
- Une synthèse des recommandations proposées.

Le groupe de travail n° 5 concerne le thème « Procédés de fabrication », lequel se divise en deux parties :

- Thème n° 5.1 : Les procédés liés à la production de pièces optiques ;
- **Thème n° 5.2 : L'offre de l'Optique dans les procédés de fabrication .**

Suite à une demande auprès de plusieurs membres du Club Laser et Procédés celui-ci a décidé de répondre collectivement en créant un groupe de travail composé des membres suivants :

- Rémy Fabbro (CLFA)
- Wolfgang Knapp (CLFA)
- Jacky Portrat (BT/PCLB)
- Eric Fogarassy (IREPA LASER)
- John Lopez (CELIA - PALA) *coordinateur*
- François Salin (CELIA - PALA) *membre invité*

Le Club Laser et Procédés a en charge le thème n° 5.2 pour lequel les points à développer sont les suivants :

- Usinage, assemblage et traitements de surface mécaniques
- Applications à d'autres domaines d'applications ;
- Les applications des impulsions ultra-courtes (pico et femtosecondes) ;
- Utilisation des effets optiques en prototypage rapide
- *Les matériaux optiques comme substrats pour les bio-capteurs (?)*

La problématique des sources laser devra également être traitée en fonction des divers points abordés.

Contact SFO : D. Laroche (Pôle Optique et Vision St Etienne)

Longueur du document : 8 pages

Délais :

- ébauche fin Juillet
- version finale début Septembre

TRAME PROPOSEE

Note : Nous traitons dans ce document des applications liées à la transformation de la matière par laser, néanmoins il existe d'autres secteurs industriels impliquant des lasers pour des applications de métrologie, de télémétrie, de pointage, de show-laser, de lecture audio/vidéo grand public ou encore de transport d'informations.

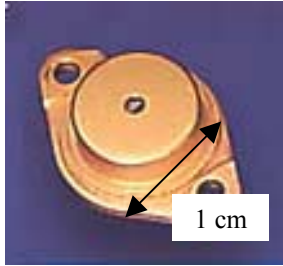
Historique du laser industriel en France

Qu'est-ce qu'un laser ?

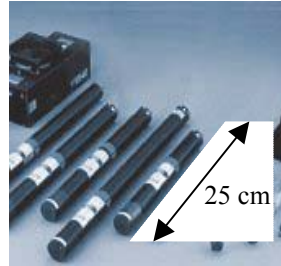
Le terme LASER est l'acronyme anglais de *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*. Schématiquement, un laser comprend un résonateur optique, un milieu amplificateur et une source d'énergie. La longueur d'onde du rayonnement laser (sa couleur) dépend de la nature du milieu amplificateur. L'apport d'énergie est assuré par un système de pompage externe à la cavité (décharge électrique, radiofréquence, lampe flash, diode laser ou laser de pompe). Le rayonnement issu d'une cavité laser est généralement monochromatique, de forte intensité, cohérent et fortement directionnel. Il existe divers types de laser : CO₂, Nd :YAG, argon, à colorant, à vapeur de cuivre, diode, femtoseconde. Plusieurs technologies sont possibles :

- les *lasers à rayonnement continu*, dont les applications concernent plus particulièrement le soudage, la métrologie, l'instrumentation et la visualisation ;
- les *lasers à rayonnement impulsionnel*, dont les applications concernent l'usinage en général, la télémétrie, les télécoms et la métrologie. La durée varie de 10^{-3} à 10^{-14} seconde.

Les photographies ci-dessous montrent combien les lasers peuvent être différents en fonction de leur technologie, leur performance et leur application.



Diode laser :
électronique, optique



Laser Hélium-Néon :
alignement, science



Laser de marquage



Laser de découpe

Historique du laser

Apparu en 1960, mais préfiguré par Einstein au début du XXe siècle, le laser désigne une amplification lumineuse puissante obtenue à partir d'une manipulation du photon. Voici quelques grandes dates qui ont marqué l'histoire du laser.

1905 : Albert Einstein dégage l'existence du photon. C'est une énergie ou un rayonnement qui peut être excité dans certaines conditions. Aussitôt, les scientifiques pressentent que si l'on parvient à le maîtriser, on pourra se servir de ce rayonnement.

1917 : Albert Einstein énonce la théorie de l'émission stimulée de radiations lumineuses.

1954 : Le premier générateur de rayonnement mettant en œuvre " l'émission stimulée " est créé aux Etats-Unis, par Charles Townes. C'est un générateur micro-onde, qui fonctionne au gaz ammoniac, dit MASER (*Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation*).

1957 : Gordon Gould invente le mot LASER et le laser à gaz.

1960 : Le premier générateur de rayonnement optique cohérent ou laser est créé par Maiman. Constitué d'un barreau de rubis synthétique aux faces polies, entouré d'une lampe hélicoïdale, il suscite une lumière cohérente rouge. Après quelques années et l'intervention de fonds militaires,

naissent les premières applications (perçage, découpage, soudage). Parallèlement se développent de nouveaux types de laser : laser Hélium-Néon, laser CO₂.

1966 : Première application industrielle du laser : perçage du rubis. Alfred Kastler obtient le prix Nobel de Physique pour ses travaux dans lesquels il pose les bases du pompage optique.

1967 : En France, invention du laser CO₂ à flux transverse. En Angleterre, invention de la découpe laser avec gaz d'assistance.

1969 : Laser à rubis militaire, télémètre, mesure de la distance Terre-Lune.

Années 70 : Avec la découverte d'autres applications pour le laser comme l'holographie, le grand public prend conscience de sa puissance et de son intérêt. De nouveaux lasers apparaissent.

1972 : Utilisation du laser comme pointeur laser lors de la guerre du Vietnam.

1974 : La société Moulinex a été la première société française à utiliser le laser en production pour le soudage de panier à légumes. Le procédé était à l'époque peu rentable mais a eu un accueil favorable de la part du grand public et l'opération a été un succès commercial.

1979 : Invention du marquage laser. En France, première machine de découpe 3D en production. Cette machine intégrait déjà toutes les fonctionnalités des machines actuelles.

1983 : Premier missile équipé de guidage laser.

1986 : Programme Guerre des Etoiles aux USA basé sur l'utilisation de laser pour la destruction en vol de missiles balistiques.

1987 : Gordon Gould fait breveter son laser à gaz, conçu en 1957.

Années 90 : Le développement des outils de calculs informatique permet d'améliorer considérablement la productivité et la qualité d'usinage des machines laser. Premiers essais de nettoyage de monuments historiques par laser (Yag doublé).

1990 : Invention des lasers à impulsions ultra-brèves (femtoseconde). Invention du prototypage rapide par frittage laser

Années 2000 : Fort développement des diodes lasers et arrivée des premiers lasers à solide industriels pompés par diodes. Emergence de l'assemblage de thermoplastiques par laser, du marquage interne et du micro usinage.

Début du laser industriel en France

La communauté scientifique française a toujours suivie et contribué au développement de la connaissance et de la technologie laser, mais curieusement les applications industrielles ont eu du mal à sortir du cadre des laboratoires scientifiques ou industriels. La pénétration de la technologie laser dans les entreprises françaises fut lente depuis le début et reste lente encore aujourd'hui.

Outre les études laboratoires à titre de *curiosité de laboratoire*, les premiers travaux sur les lasers (années 60-70) l'ont été à des fins militaires, pour des applications souvent confidentielles pour des raisons de *secret défense*. Les communautés scientifiques et industrielles civiles n'ont pas bénéficié des connaissances et des développements technologiques engendrés par ces travaux.

Le programme « laser » français lancé dans les années 80 par le gouvernement a essentiellement bénéficié aux grandes entreprises nationales liées à l'industrie de la Défense Nationale et au Commissariat à l'Energie Atomique (CEA). Les technologies, les connaissances et les savoir-faire issus de ce programme n'ont visiblement pas bénéficié aux petites et moyennes entreprises des autres secteurs de l'industrie.

Les quelques fabricants de laser français de l'époque (QUANTEL, CILAS, LASER CHEVAL, BM industrie ...) n'ont pas connu l'essor de leurs homologues allemands (TRUMPF, ROFIN SINAR, BAASEL, LAMBDA PHYSIK ...). On peut regretter certains choix technologiques, de la part de quelques fabricants français, qui ne correspondaient pas à un besoin industriel. On peut également regretter le manque de coordination et de collaboration entre ces fabricants et les utilisateurs industriels.

Il faut malheureusement souligner que la technologie n'était pas encore assez mature et que certains industriels se sont équipés trop tôt. Les nombreux dysfonctionnements et pannes des machines de l'époque ont longtemps porté préjudice à cette technologie. Vingt ans après, certains cadres de l'industrie, jeunes ingénieurs à l'époque, gardent une mauvaise image du laser.

Parallèlement au programme français, le gouvernement allemand avait mis en place au début des années 90 le programme « Laser 2000 » destiné à diffuser la technologie laser vers l'ensemble des acteurs industriels (petites, moyennes et grandes entreprises). Ce programme encourageait notamment les collaborations recherche-industrie dans tous les secteurs de l'industrie par des aides financières sous forme de co-financements 50% industriel / 50% subvention état.

A ce jour le constat est le suivant : les fabricants de laser français emploient de 5 à 50 salariés (THALES LASER, QUANTEL, HIGHWAVE, SOPRA, CILAS, AMPLITUDE ...) alors que les deux principaux fabricants de laser, TRUMPF et ROFIN BAASEL, emploient respectivement 4000 et 1000 salariés.

Le marché actuel du laser industriel en France

Le marché du laser industriel en France

Nous n'avons pas les données chiffrées pour la France. Voici quelques données au niveau mondial pour l'année 2002 concernant la transformation de la matière par laser :

- La part du laser sur le marché de la machine outils représente 10% et pèse 4 milliard d'Euro ;
- Les applications concernent pour 50% les applications macro et 50% les applications micro (en hausse) ;

- Le marché se divise comme suit : 50% pour la découpe et le soudage, 30% pour le marquage et 15% pour le micro usinage ;
- Pour les applications de découpe, le nombre de lasers vendu annuellement est de 20000 sources CO₂ (stagnation) et 10000 sources Nd/YAG (forte croissance) ;
- Pour les applications de soudage, le nombre de lasers vendu annuellement est de 2500 sources CO₂ et 1100 sources Nd/YAG ;
- La croissance annuelle du marché est estimée 0 15 à 20% pour la période 2002-2006 ;
- L'Europe regroupe 40% des 195 000 lasers industriels recensés au niveau mondial.
- Les principales sources utilisés sont : les lasers CO₂ de puissance supérieure à 500 Watt (37%), les lasers Yag de puissance inférieure à 100 Watt (25%) et les laser excimère de puissance inférieure à 100 Watt (23%, essentiellement pour la micro électronique et l'ophtalmologie).

Note : ces données ne prennent pas en compte les autres secteurs industriels impliquant des lasers pour des applications de métrologie, de télémétrie, de pointage, de show-laser, de lecture audio/vidéo grand public ou encore de transport d'informations. Pour information, le secteur des télécoms est le premier consommateur mondial de lasers de faible puissance.

L'évaluation du marché en France est délicat car de nombreux utilisateurs sont non identifiés, donc non recensés. D'une manière générale le marché du laser industriel en France est peu développé par rapports à nos voisins allemands, italiens ou anglais. La faiblesse et l'hésitation du marché français vis-à-vis des procédés laser en général ne donnent pas une base suffisante pour le développement et la croissance des sociétés françaises fabricant de sources ou de machines laser, contrairement à ce que l'on peut observer en Allemagne par exemple. Il est vrai que les procédés laser restent pour la plupart des procédés à haute valeur ajoutée car onéreux.

Néanmoins, il est étonnant de constater que les deux principaux marchés porteurs français que sont l'aéronautique et l'automobile n'ont pas contribué au développement de la filière photonique comme nos voisins européens, alors que ces deux secteurs ont les capacités d'investissement et sont considérés comme particulièrement innovants dans leur domaine respectif. Les principaux arguments contre l'introduction significative du laser sur les lignes de production dans le secteur automobile sont, selon les constructeurs :

- Un ratio productivité/coût de production trop bas ;
- Une fiabilité industrielle insuffisante ;
- L'impossibilité de délocaliser des unités de production *hightech* vers les pays en voie de développement pour lesquels la main d'œuvre est moins onéreuse. La maintenance d'un laser de dernière génération au Brésil ou au Maroc par exemple pauserait problème. Il en est de même pour la formation des cadres et opérateurs.

Par ailleurs, les quelques fabricants de machines laser français doivent faire face à une concurrence croissante de la part des pays de l'Europe de l'Est et d'Asie, qui proposent des produits à tarifs compétitifs compte tenu du coût réduit de la main d'œuvre.

Sans toutefois avoir les puissances commerciale et de production de nos proches voisins, les acteurs français du laser ont su se positionner sur les marchés émergents tant au niveau des sources que des procédés (voir paragraphe 4). L'innovation dans le domaine du laser est porteuse d'activités. Il apparaît stratégique de soutenir ces actions innovantes pour pérenniser et développer ces nouvelles activités, en particulier les sources laser et procédés liés aux micro technologies.

Outils d'accompagnement technologique et d'aide à l'investissement

Le Gouvernement Français, l'Union Européenne, et les collectivités territoriales ont mis en place plusieurs outils d'accompagnement pour soutenir l'innovation et la diffusion des nouvelles technologies. Parmi ces outils, on peut citer :

- La France dispose d'un réseau de *Centres Techniques* laser couvrant tous les secteurs d'activités et assurant une bonne couverture nationale. Ces centres techniques sont des outils à la disposition des industriels pour faire réaliser des études, acquérir les technologies et savoir-faire. Ces centres et leurs personnels ont des statuts bien différents d'une région à l'autre (statut : association, service universitaire, ADER, école d'ingénieur / personnel : universitaire, CNRS, chargé de mission régional, privé). On estime qu'une centaine de personnes travaillent dans ces centres, contre cinq à dix fois plus en Allemagne ;
- Le *Club Laser et Procédés* (CLP) est un regroupement professionnel (association Loi 1901) qui fédère la plupart des acteurs français dans le domaine du laser industriel au travers cent cinquante membres : fabricants, distributeurs, utilisateurs, grandes entreprises, centres techniques, universitaires. Le CLP coordonne chaque année plusieurs actions de communication dans le domaine du laser industriel. Un portail de veille technologique, accessible sur Internet, a été mis en place depuis 2002. Malheureusement les moyens financiers et politiques du CLP sont insuffisants pour agir et peser sur l'évolution du laser industriel en France ;
- Des *Aides Financières* directes et indirectes à différents niveaux en favorisant les partenariats recherche-industrie (réseaux nationaux, projets européens, prestation technologique réseau, pôles sectoriels régionaux ...), en proposant des aides à l'investissement (Procédure Atout, dotation Anvar ...) et encourageant l'embauche de jeunes diplômés pour une activité de recherche ;
- Le *Concours National d'Aide à la Création d'Entreprises Innovantes*, subvention à hauteur de 50% pour les frais de développement et de marketing ;
- Les *Pépinières d'Entreprises* et *Incubateur* mis en place par les collectivités locales pour soutenir l'émergence de *Jeunes Pousses* en mettant à leur disposition des locaux et des services mutualisés, en offrant formation sur la création d'entreprise et un accompagnement.

Il est indéniable que les outils présentés ci-dessus apporte un soutien considérable pour la diffusion de l'information et des procédés laser. On peut cependant regretter le manque d'action coordonnée (par qui ?) et le manque de visibilité des PME/PMI parmi tous ces outils.

Les procédés de fabrication par laser

Nous classons les procédés de fabrication par laser en trois grandes catégories :

- les procédés d'assemblage
- les procédés d'usinage
- les procédés de traitement ou modification de surface

Processus d'interaction

Les connaissances scientifiques concernant l'interaction laser-matière n'ont malheureusement pas connu le même essor que les technologies lasers et ses technologies connexes (optique, opto-mécanique, électronique, robotique, informatique). Ce constat s'explique par l'extrême complexité des processus mis en jeu et ne remet pas en cause la qualité du travail de recherche entrepris depuis 30 ans dans le domaine par nos équipes de recherche nationales. La compréhension de ces processus est un travail de longue haleine qui nécessite des compétences pluridisciplinaires.

Les paramètres à prendre en compte pour un traitement laser sont : la puissance, le taux de répétition, la durée d'impulsion, la longueur d'onde, le profil d'intensité, le diamètre et la qualité du faisceau. L'ensemble de ces paramètres et la nature de la cible vont déterminer le type d'interaction et le résultat final du traitement laser. Des paramètres secondaires peuvent entrer en jeu comme le gaz de couverture, l'état de surface de la cible, la continuité et la discontinuité de la matière constituant la cible.

Dans la majorité des cas le processus est *thermique* (diffusion de la chaleur, fusion, vaporisation). L'usinage est rapide mais s'accompagne d'effets collatéraux significatifs : bavures, projections de métal en fusion, rugosité sur le chant de coupe, modification de la matière, apparition éventuelle de fissures. Il correspond généralement à des sources laser type CO₂, Nd:YAG ou Diode. Dans le cas de l'usinage d'un polymère par rayonnement ultraviolet (UV), le processus peut être *photochimique*, on parle alors de photoablation. Les effets de bords sont réduits, voire non significatifs. Enfin, on parle de processus *athermique* pour les lasers à impulsions ultra-courtes (pico et femtoseconde), pour lesquels la brièveté des impulsions permet de réduire notablement les effets thermiques sur la plupart des matériaux. Il est noter que les processus *photochimique* et *athermique* correspondent à des technologies laser plus récentes, donc plus onéreuses, moins fiables et souvent moins productives.

Avantages du laser

Il y a quelques années encore le laser était perçu comme un procédé de remplacement par rapport aux techniques d'usinage et d'assemblage plus conventionnelles : on cherchait à refaire la même pièce avec un laser. A l'inverse, la tendance actuelle consiste à prendre en compte l'usinage laser dès la conception de la pièce. Les pièces, dont la fabrication fait appel au laser, sont de plus en plus optimisées vis-à-vis de ce nouvel outil de production et

permettent d'en tirer au maximum profit. Le laser permet ainsi une réduction des temps de cycles et une réduction de la masse de la pièce.

La qualité et la flexibilité de l'usinage laser permet de s'affranchir de bons nombres d'étapes de pré ou post-traitement, de contrôle qualité dans un procédé de fabrication. En ce sens, le laser apporte un réel gain en coût et temps de production. Le laser apporte également de nouvelles possibilités en terme d'usinage, en marquage interne ou en micro usinage par exemple.

Dans la plupart des cas le traitement laser est sans contact, ce qui permet de s'affranchir des problèmes liés à l'usure de l'outils ou d'envisager l'usinage d'objets très fragiles.

Le laser concerne aujourd'hui des applications niches qui se justifient pour des considérations de faisabilité, de flexibilité, de rapidité, de gain en performance ou de coût.

Nous décrivons ci-dessous les diverses applications du laser tous secteurs confondus,

Les procédés d'assemblage par laser

Soudage laser

Procédé consistant à assembler deux pièces métalliques par fusion et interpénétration des matériaux. Le soudage laser s'effectue avec ou sans apport de matière. Le soudage laser donne une zone affectée thermiquement (ZAT) réduite par rapport aux techniques conventionnelles. Pour un rayonnement continu le cordon de soudure est continu, fin et pénétrant. Le chauffage prolongé ($>10^6$ W/cm²) provoque l'apparition du *keyhole*, capillaire rempli de vapeur métallique, lequel confère un aspect fortement directionnel au soudage. Pour un laser pulsé, le cordon de soudure est fin et superficiel. On distingue la soudabilité métallurgique (qui traduit la compatibilité métallurgique des deux matériaux à assembler) et la soudabilité opératoire (qui concerne le choix des paramètres du *process*). Les instabilités du bain fondu et le découplage laser-matériau provoqué par l'apparition d'un plasma au dessus de la cible introduisent des défauts dans le cordon de soudure (porosité, inhomogénéités, projections, géométrie ...). Le choix des paramètres laser et du gaz de couverture sont donc déterminants sur la qualité et la tenue mécanique du cordon. Le procédé offre une large variété de type de joint possible : par transparence, à clin, bords à bords... Les têtes de focalisation *bispot* permettent d'atténuer fortement les instabilités du bain fondu.

Plusieurs procédés de soudage hybride TIG/Laser ou MIG/Laser sont en développement. Ces derniers permettent d'allier la souplesse au niveau du joint d'accostage offert par les procédés TIG et MIG, et la forte pénétration du soudage laser.

Le *raboutage* consiste à assembler bords à bords deux tôles d'épaisseurs différentes dans le but d'optimiser localement la quantité de matière et le poids de la pièce par rapport à son utilisation future et les contraintes subies.

Le *remote welding* consiste à utiliser une tête à déflexion optique pour le déplacement du faisceau sur un ensemble de petites pièces afin de grouper plusieurs opérations de soudage.

Le *brasage* consiste à assembler deux matériaux sans en provoquer la fusion. La jonction est assurée par le métal d'apport dont la température de fusion est bien inférieure à celles des deux matériaux à assembler. Ce procédé est utilisé pour assembler deux matériaux réputés

non compatibles au niveau métallurgique ou pour minimiser l'échauffement des éléments à assembler, en micro électronique par exemple. La tenue mécanique des assemblages brasés est inférieure à celle obtenue en soudage.

Exemples : soudage de tuyauteries en titane et de raidisseurs en alliage d'aluminium sur panneau de fuselage (EADS), soudage de lame de rasoir sur ressort (GILLETTE), ratoutage de tôle pour l'automobile, brasage de composants électronique

Techniques concurrentes : arc électrique, TIG, MIG, Stir Welding, rivetage, collage

Assemblage de thermoplastique par laser

L'assemblage de thermoplastique, analogue au soudage métallique, s'effectue *par transparence* sur deux pièces préalablement bridées. En pratique, le rayonnement laser traverse un matériau transparent pour être absorbé par un matériau opaque sous-jacent au niveau de l'interface entre ces deux matériaux. Le matériau opaque s'échauffe et transfère de la chaleur par conduction au matériau transparent. L'échauffement contrôlé des deux matériaux conduit à l'interpénétration des chaînes polymères sur une épaisseur de 50 microns environ, ce qui provoque la liaison entre les deux pièces. L'assemblage présente une excellente qualité visuelle et mécanique. Ce procédé est précis, rapide et très flexible, cependant il est limité par les domaines d'absorption de chaque polymère. Il est néanmoins possible d'assembler des matériaux non absorbant soit en incorporant dans leur formulation des adjuvants ou additifs adéquates, soit en intercalant un film polymère absorbant entre les deux pièces à assembler. L'ajout de charge (talc, colorant, noir de carbone, fibres) permet de moduler la transparence d'un matériau. Ce procédé récent met en jeu des lasers à diodes ou des laser Nd :YAG. L'assemblage *bords à bords* présente moins d'intérêt puisque le cordon est à la fois moins esthétique et moins résistant au niveau mécanique.

Exemples : assemblage de support de filtre, assemblage de boîtier de télécommandes IR, découpe/soudage d'airbags

Techniques concurrentes : induction, collage, agrafe, clipage, transfert thermique

Les procédés d'usinage par laser

Découpe laser

Procédé consistant à réaliser une découpe partielle ou totale d'un matériau selon un motif prédéfini. On distingue la découpe 2D, dite découpe à plat », et la découpe 3D pour des surfaces non planes. Le processus d'interaction est principalement thermique. Les paramètres d'usinage, tels que la puissance, la vitesse d'avance, le diamètre et le profil d'intensité du faisceau, déterminent la vitesse et la qualité de coupe d'un matériau et d'une épaisseur donnée. Le rayonnement laser peut être couplé avec une buse injectant du gaz sous pression sur la zone en interaction. La nature et le débit de ce gaz déterminent l'effet de ce dernier :

expulsion du métal fondu par effet mécanique, accélération de la coupe par réaction exothermique, inhibition d'une réaction comme une oxydation par exemple, ou une amélioration de la qualité de coupe. La découpe de tôles de fortes épaisseurs (>5 mm) sera réalisée à l'aide d'un laser à rayonnement continu (type CO₂ ou Nd :YAG) tandis que la découpe de tôles fines (<2 mm) mettra en œuvre un laser impulsif (type Nd :YAG essentiellement). On distingue les machines à têtes mobiles multi-axes, les machines portiques, les machines robots (moins précises) et plus ponctuellement les machines à têtes à déflections optiques (déplacement rapide et sans inertie). La découpe laser est bien implantée au niveau industriel en général tant au niveau sous-traitance que production.

Exemples : découpe de spoiler avant pour automobile (SCGI), découpe d'ouverture sur carrosserie automobile (PSA), découpe de tubes pour assemblage mécano soudés (GIAT), découpe facile de film plastique pour emballage, découpe de tissu kevlar, découpe de plancher naval, découpe d'échangeur thermique, pré-découpe de céramique pour l'électronique (scribing) ...

Techniques concurrentes : usinage mécanique, usinage grande vitesse, oxycoupage, jet d'eau

Perçage laser

Procédé consistant à percer un matériau sous l'action d'un rayonnement laser, généralement pulsé. Plusieurs techniques sont possibles : à la volée, par détournage, par alésage, par percussion. La gamme de diamètre s'étend de $5\text{ }\mu\text{m}$ à 5 mm avec une précision de $30\text{ }\mu\text{m}$. Les lasers utilisés sont essentiellement de type CO₂ ou Nd :YAG.

Les technologies actuelles ne permettent pas de répondre à tous les besoins en terme de perçage profond ($>1\text{ mm}$), soit le rapport de forme maximum est insuffisant soit la qualité du trou ne correspond pas à celle attendue. Une des problématiques contemporaines non résolues est le perçage d'injecteur pour moteur automobile à injection directe. Cette problématique, qui concerne de nombreux constructeurs, ne trouve pas de solution à l'heure actuelle en terme de faisabilité et productivité.

Les taux de répétition élevés accessibles aujourd'hui et les récents développement en optomécanique permettent le perçage à la volée à très haute cadence ($250\,000$ trous par seconde) sur du papier ou films polymères de faible épaisseur.

Exemples : perçages droits et inclinés sur aubes et distributeurs de turbines en aéronautique (SNECMA, TURBOMECA), perçage de papier à cigarette (PAPETERIES DE MALLAUCENE), perçage via en micro électronique, perçage du capot plastique sur micro toxicomètre (OLDHAM)

Techniques concurrentes : perçage mécanique, UGV /perçage à sec, poinçonnage, faisceau d'électrons

Marquage laser

Procédé consistant à produire localement un contraste sur la cible par divers processus : enlèvement de matière (gravure), carbonisation, changement de pigmentation, concentration de pigment, dépolissage, gravure et mise à jour d'une sous-couche, par changement d'indice optique ou par fusion de poudre d'encre. Le marquage est généralement superficiel, profond (3D) ou interne. Le marquage laser aujourd'hui utilise essentiellement des têtes à déflection optique, lesquelles confèrent flexibilité, précision et rapidité d'exécution. La cadence de marquage, qui reste inférieure à celle obtenue avec une imprimante jet d'encre industrielle, permet de marquer plusieurs centaines de caractères à la seconde. Le marquage matriciel laser, de plus faible résolution, permet d'atteindre des cadences bien plus élevées : 25 pièces par seconde comportant avec deux lignes caractères par pièce (date de péremption et numéro de lot). Le marquage laser peut avoir plusieurs fonctions : identification, traçabilité (numéro de lot, horodatage), authentification (anti-contrefaçon, numéro de marché), décoration.

Exemples : marquage de câble pour l'aéronautique (EADS), gravure de poinçon de frappe et cylindre d'embossage (ALLTEC), gravure de moule pour semelles élastomère de chaussures (ALLTEC), marquage du bois (ES TECHNOLOGY), marquage interne sur objet décoratif (3D SYSTEMES, VITRO), marquage de code DataMatrix sur ampoule médicale, marquage sur composant de tableau électrique (LEGRAND), gravure de bouton rétro éclairés pour tableaux de bords automobile et façades d'autoradio.

Techniques concurrentes : projection d'encre, tampographie, sérigraphie, étiquetage, micro poinçonnage, micro fraisage, rayage, à chaud, par transfert thermique

Prototypage rapide

Procédé consistant à créer un objet tridimensionnel en utilisant le laser pour fondre localement une poudre métallique (*projection de poudre* ou *frittage laser*) ou pour photopolymériser une solution monomère (*stéréolithographie*). Ces procédés permettent l'obtention rapide de pièce bonne matière, homogène ou à gradient de propriétés (multiphase ou variation progressive de composition).

Les pièces fabriquées par *projection de poudre* ou *frittage laser* nécessitent généralement une finition par usinage mécanique pour atteindre un état de surface correct et une bonne précision géométrique. La *projection de poudre*, similaire au rechargement, consiste à projeter la poudre au travers une buse pour monter la pièce couche par couche. Le *frittage laser* utilise un bac que l'on remplit de poudre progressivement au fur et à mesure que le laser traite les différentes couches de matière. Le *frittage laser* peut aussi être appliqué à la conception de pièce plastique à partir de poudre polymère. Le processus d'interaction est thermique.

La *stratoconception* (brevet français) consiste à découper des feuillards au laser puis à les assembler par soudage sur leur périphérie. Les pièces ainsi fabriquées sont des ébauches qui nécessitent une finition par usinage mécanique.

La *stéréolithographie* consiste à générer un objet en provoquant localement la polymérisation à partir d'une solution monomère à l'aide d'un faisceau laser. Le processus d'interaction est photochimique. Des travaux récents ont permis de générer des objets submillimétriques à l'aide de lasers à impulsions ultra-courtes.

Le prototypage rapide par laser est plutôt réservé aux prototypes fonctionnels et aux petites séries. Pour les grandes séries on préférera l'usinage grande vitesse (UGV) pour les métaux et alliages métalliques ou le moulage par injection pour les polymères.

Techniques concurrentes : moulage par injection, roto moulage, usinage grande vitesse

Micro Lithographie

Procédé consistant à graver une tranche de silicium avec une résolution submicronique. Ce procédé de fabrication comporte six étapes. La première étape est l'oxydation superficielle du silicium. La deuxième étape est le dépôt d'une fine couche de résine photosensible (*photoresist*) sur le silicium. Ce *photoresist* est ensuite insolé par un rayonnement laser (type excimère) selon un motif bien défini (pattern). Les zones exposées au laser sont ensuite sélectivement dissoutes par un solvant au cours de la phase de développement. On pratique ensuite une attaque chimique sur les zones mise à nue, pour graver localement l'oxyde de silicium. La dernière étape consiste à retirer le résidu de *photoresist* par un second solvant.

Ce procédé de gravure est massivement utilisé en micro électronique pour la fabrication de composants, de mémoires ou le stockage de données haute densité. On observe une diminution progressive de la résolution depuis quelques années. La résolution actuelle en production est de 90 nm avec les lasers excimères type ArF (longueur d'onde 193 nm). Les principaux fabricants de sources et machines (*stepper*) sont aux Etats-Unis. Un changement de technologie important est attendu à l'horizon 2010 avec le passage à la longueur d'onde 13,5 nm (laser à rayons X). Plusieurs programmes de recherche académique et industriel sont en cours pour développer les sources (décharge plasma...) et les optiques adéquates.

La région de Grenoble accueille un site majeur dans le domaine de la micro électronique, tant au niveau académique que industriel (ST MICROELECTRONIQUE, PHILIPS...).

Pas de technique concurrente.

Micro usinage

Procédé consistant à réaliser un motif dont les dimensions ou les tolérances sont à l'échelle du micron. Dans la plupart des cas, l'utilisateur recherche à minimiser les éventuelles dégradations de la cible (effets de bords, altération des propriétés, création de fissure, changement de composition ou de structure, délamination, zone affectée thermiquement, projections liquides, bavures, rugosité de chant). On distingue trois types de sources :

- Les *lasers à rayonnement infrarouge*, dits IR (CO₂, Nd/YAG ou Nd:YAG doublé), pour lesquels l'interaction avec la matière est thermique et donnant un usinage rapide. L'épaisseur mise en jeu à chaque impulsion varie de quelques microns à quelques millimètres. Les densités de puissance varient de 10^6 à 10^9 W/cm² (une fois focalisé).
- Les *lasers à rayonnement ultraviolet*, dits UV (Excimère, Nd:YAG triplé ou quadriplé), pour lesquels l'interaction avec les matériaux organiques est principalement photochimique (on parle de *photoablation*). L'épaisseur de matière mise en jeu à chaque impulsion est micrométrique. L'usinage est donc plus lent. En contrepartie, la courte longueur d'onde donne accès à une meilleure résolution qu'en

IR. Les densités de puissance sont de l'ordre de soit 10^9 à 10^{12} W/cm² (une fois focalisé). L'inconvénient majeur est que le matériau doit avoir une bande d'absorption à la longueur d'onde du laser.

- Les *lasers à impulsions brèves* (picoseconde) et ultra-brèves (femtoseconde) pour lesquels la brièveté de l'impulsion minimise les effets collatéraux (essentiellement thermiques). Pour un laser femtoseconde, la durée de l'impulsion est plus courte que le temps caractéristique de diffusion de la chaleur. L'énergie de l'impulsion est donc piégée dans le volume irradié et les effets collatéraux sont faibles voire inexistants. Par abus de langage, on parle d'usinage athermique. L'épaisseur mise en jeu à chaque impulsion est micrométrique. L'usinage est donc lent. En outre la brièveté de l'impulsion permet d'atteindre des densités de puissance très élevées, soit 10^{12} à 10^{15} W/cm² (une fois focalisé).

Les procédés de micro usinages laser sont présents au niveau industriel mais sont encore freinés par le coût élevé des sources et leur faible productivité. Le coût diminue avec les années. La faible productivité s'explique par le fait que « pour usiner proprement il faut ablater peu de matière à chaque impulsion ». Le micro usinage est donc lent par définition. A l'inverse, un laser Nd/YAG qui vaporise un métal sur 500 µm de profondeur par impulsion donnera inévitablement des effets collatéraux du même ordre de grandeur (la diffusion thermique est tridimensionnelle). L'accroissement du taux de répétition, tendance actuelle observée chez plusieurs constructeurs de laser UV ou femtoseconde, est une voie d'avenir pour augmenter la productivité des procédés de micro usinages. L'avenir des applications est donc lié au développement des sources et à leur fiabilité.

Les applications industrielles actuelles se justifient généralement pour des considérations de faisabilité (applications nouvelles) ou de performance (la qualité d'usinage requise n'est atteinte que par cette technologie). La tendance à la miniaturisation conduit à un développement inévitable du marché du micro usinage laser. A noter cependant le faible nombre de sous-traitant dans le domaine comparativement aux techniques macroscopiques.

Exemples : découpe de stent pour angioplastie (MICROVAL), découpe de micro cibles (CEA), micro fabrication, gravure de surface diffusante sur verre, micro marquage sur ampoule médicale

Techniques concurrentes : usinage mécanique de précision, usinage avec pointe diamantée, micro érosion, jet d'eau, laser micro jet, gravure chimique, perçage plasma

Les procédés de traitement ou modification de surface par laser

Traitement de surface

Procédé consistant à apporter ou à améliorer une ou plusieurs propriétés de surface par un traitement laser. Le mode d'action est fonction du type de laser, du niveau de traitement et bien entendu de la nature de la cible : refusion superficielle, rugosité, dépoli, transformation

allotropique, modification de composition, modification du degré de cristallinité, modification d'indice optique, fonctionnalisation, texturation de surface.

Exemples : refusion de surface, recuit du silicium pour la fabrication d'écrans plats.

Procédés concurrents : traitements chimiques, plasma froid, décharge corona, grenaillage

Rechargement

Procédé consistant à une fondre localement un métal d'apport (fil ou poudre) sur une surface pour remplacer de la matière manquante (après usure ou malfaçon) ou pour en modifier les propriétés en créant un revêtement superficiel (dépôt anti-abrasif, anti-corrosion, anti-érosion, barrière chimique, nitruration, résistance à la fatigue ...). Le métal d'apport se présente sous forme de fil ou de poudre (amenée par une buse latérale ou coaxiale, de brevet français). Il est fondu par le laser IR au contact du substrat pour former une couche légèrement épitaxiée conférant de nouvelles propriétés à ce dernier. Les applications du procédé sont encore très récentes, mais présentent un fort potentiel. Des études sont également menées en laboratoires sur l'utilisation du laser pour refondre des feuillards métalliques sur une surface.

Applications : réparation de moule d'injection plastique, réparation de pièce aéronautique (AIR France), dépôt anti-abrasif sur outillage mécanique (TECHNOGENIA).

Techniques concurrentes : rechargement au chalumeau, projection thermique, plasma d'arc, dépôt CVD, dépôt chimique

Nettoyage / Décapage de surface

Procédé consistant à éliminer une couche superficielle de contaminant sur un substrat par ablation thermique, par photoablation ou par effet photo-acoustique (voir paragraphe 3.1).

L'effet photo-acoustique provient de la propagation l'onde acoustique initiée par l'impulsion laser dans le matériau (dilatation thermique et réaction au départ de matière) ainsi que la discontinuité de la matière. Il provoque le décollement du contaminant sans altérer le matériau sous-jacent. Ce procédé, peu utilisé, représente essentiellement deux types de marché : la rénovation de monument historique et le nettoyage de moule d'injection (plastique ou verre).

Les lasers utilisés sont principalement des lasers IR (photo-acoustique) et plus rarement des lasers UV (photoablation). Les lasers UV confèrent en plus une sélectivité chimique au procédé, c'est-à-dire que chaque matériau a un seuil d'ablation propre et que la différence de seuil d'ablation entre deux matériaux peut être mis à profit pour ablater sélectivement un matériau sans altérer l'autre (exemple : ablation d'un film polymère sur un métal ou un verre).

Exemples : Nettoyage de moules de pneu (MICHELIN), nettoyage de moule en verrerie (BSN), dépoussiérage de composants électriques sous tension (EDF), décontamination nucléaire de déchets secondaires (ONET)

Procédés concurrents : traitements chimiques, décapage mécanique, projection de média plastique ou amidon, décapage cryogénique

Dépôt par ablation laser

Procédé consistant à réaliser un dépôt à partir du panache d'ablation. La matière éjectée au cours de l'interaction peut en effet être interceptée par un substrat, généralement placé en vis-à-vis de la cible et chauffé à haute température, pour former une couche mince de stœchiométrie contrôlée. L'interaction du panache d'ablation avec le gaz ambiant permet de moduler cette stœchiométrie en fonction de la pression et de la composition de ce gaz. Ce procédé permet en outre d'obtenir des phases métastables. Le laser utilisé est généralement un laser excimère. Bien que plusieurs laboratoires nationaux travaillent sur ce thème, ce procédé reste jusqu'ici au stade de laboratoire car de nombreux problèmes subsistent : difficulté de mise en œuvre, zone de dépôt réduite, uniformité de la couche formée, présence d'agrégats indésirables, renouvellement de la surface cible. On note néanmoins quelques applications potentielles : fabrication de composants pour MEMs, réalisation de films à stœchiométrie complexe (exemple : film supraconducteur YBCO).

Techniques concurrentes : dépôt électrochimique, dépôt électrocatalytique, CVD, PVD, pulvérisation thermique

Etat actuel des recherches académiques et industriels

Les enjeux actuels

Développer le marché et les produits

Il y a toujours eu en France, des compétences en développement laser à la fois dans le milieu scientifique et industriel, malheureusement pour une raison qui nous échappe ce savoir-faire et ces connaissances théoriques ne percent pas et ne donnent pas lieu à une activité industrielle d'envergure. Il en est de même au niveau des applications du laser. Inverser cette tendance est donc un enjeu majeur.

Concevoir et produire des sources moins chères et plus fiables

D'un point de vue général, les technologies qui émergent et s'imposent dans l'industrie répondent aux quatre *critères* suivants :

- Simplicité
- Fiabilité
- Performance
- Faible coût

Les diodes laser et le laser CO₂ répondent aux quatre critères cités ci-dessus, ils sont et resteront pendant les années à venir largement diffusés dans l'industrie. Les problèmes de fiabilité rencontrés depuis quelques années avec les diodes laser sont en passe d'être résolus notamment en utilisant les diodes bien en deçà de leurs performances limites. A l'inverse,

certaines technologies laser ne sortiront jamais des laboratoires sauf évolution majeur : laser à colorant, laser à vapeur de cuivre, laser erbium, laser alexandrite, laser argon. Le laser Excimère se maintient actuellement car il est utilisé de manière exclusive sur quelques applications niches (micro lithographie et chirurgie réfractive essentiellement), cependant il n'a jamais réellement percer au niveau industriel pour des considérations environnementales (il utilise du gaz fluor), de maintenance et de productivité.

Le coût d'un laser dans un procédé industriel se résume en trois points :

- Le coût d'achat intègre à la fois le *coût de fabrication* et le *coût de développement*, ce dernier est lié au volume produit ;
- Le *coût de maintenance* est fixe pour une technologie donnée ;
- Le *coût d'utilisation* est fonction du taux d'utilisation machine, donc de l'application.

La réduction des coûts passe donc essentiellement par une réduction des coûts de fabrication et de maintenance. Les technologies d'avenir seront a priori celles qui utilisent des composants fiables à bas coût. Le pompage par diode des lasers à solide (Nd :YAG, Nd :VO₄, femtoseconde) est donc une évolution majeure qui réponds aux quatre précédents critères, encore faut-il accroître la durée de vie réelle des diodes lasers et s'orienter vers des diodes produites en grande quantité (celles produites pour les télécoms par exemple). Ainsi l'introduction du pompage par diode dans la technologie Nd/YAG améliore sensiblement les performances en terme de compacité et qualité de faisceau, en particulier pour les Nd:YAG à durée d'impulsion nanoseconde et picoseconde.

Pérenniser les développements récents dans les micro technologies

Il est peu probable que la France rattrape son retard au niveau des procédés macroscopiques, par contre le positionnement de la recherche et de l'activité industrielle sur les procédés microscopiques est en train de se jouer maintenant, au niveau européen et au niveau mondial. Compte tenu du potentiel de recherche et de la capacité d'investissement des industries allemandes (et dans une moindre mesure italiennes et anglaises) il paraît crucial de soutenir les efforts de développement français dès aujourd'hui, afin aider la filière photonique à se maintenir et à s'imposer comme des acteurs incontournables dans les domaines des procédés microscopiques (recherche fondamentale, recherche appliquée, transfert de technologie, fabrication de laser, fabrication de machine laser, sous-traitance).

Nous présentons dans les deux paragraphes suivants les thèmes porteurs à ce jour ainsi que les évolutions en cours. Le premier paragraphe est consacré aux sources lasers, le second est orienté procédé.

Thèmes en développement – Sources laser

L'avenir des procédés laser est lié au développement des sources et à leur fiabilité.

Laser à diodes

Le pompage par diode laser en général est un thème actuel. Outre la réduction de coût et le gain en fiabilité mentionnés plus haut dans le texte, il permet de concevoir des sources plus compactes et avec une meilleure qualité de faisceau.

Les lasers à diodes sont également utilisés comme source principale pour les applications d'assemblage de thermoplastiques ou pour le rechargement.

Laser à impulsions ultra-courtes pompés par diodes (pico et femtosecondes)

Les lasers femtosecondes et picosecondes sont en train de subir une révolution au travers de l'arrivée du pompage par diode laser. Ces sources atteignent des niveaux de performance et de fiabilité qui permettent d'envisager de véritables applications industrielles. Il reste à diminuer leur coût et surtout à prouver l'intérêt économique des impulsions brèves dans les applications. C'est sans doute le secteur amené à subir la plus grande croissance dans les années à venir.

Laser à disque (brevet d'exploitation allemand)

Une des difficultés rencontrées avec les lasers à solide pompés par diode est la gestion des effets thermiques dans le milieu laser. Le laser à disque est une solution élégante à ce problème. Elle permet d'obtenir des puissances moyennes de plusieurs centaines de watts avec des faisceaux de qualité raisonnable. D'autres solutions existent ou seront découvertes et le laser à disque restera une solution parmi les autres.

Laser à fibre

Les fibres sont une autre solution au problème de la thermique. Les lasers à fibre produisent actuellement 500 watt en mode fondamental. De plus ces lasers sont très faciles à grouper pour atteindre des puissances de plusieurs kilowatts. La technologie des fibres laser a beaucoup bénéficié du *boom* des télécommunications et continue à évoluer très rapidement. Il faut s'attendre à une place importante dans le domaine pour l'ensemble des lasers à fibre.

Laser excimère forte puissance à commutation solide (sans thyatron)

La technologie excimère actuelle utilise plusieurs composants dont la fiabilité et les performances sont limitées (un des éléments critiques est un composant nommé thyatron). Cette technologie n'a jamais connu l'essor escompté car malgré les progrès réalisés car elle reste trop complexe et les coûts d'utilisation et de maintenance sont bien trop importants. Les seules applications actuelles se justifient pour une raison de faisabilité : micro lithographie, gravure de réseau de Bragg sur fibre optique, gravure de verre en lunetterie, chirurgie réfractive (médical).

Le groupe français ONET devrait d'ici quelques mois commercialiser une nouvelle génération de laser excimère forte puissance sans thyatron, soit à commutation solide. Les performances

(1kW 3J/pls 500Hz 308nm 1M€) et le coût de ce laser sont compatibles avec des applications de nettoyage et traitement de surface par laser.

Note : le développement des parties opto-mécaniques des machines laser est aussi important que le développement des sources laser, il y a autant de progrès à espérer d'un côté que de l'autre pour faire avancer les procédés laser : moteur linéaire à grande dynamique, magasin et chargement automatique, capteur de positionnement, tête à déflection optique à grande dynamique ...

Thèmes en développement – Procédés laser

Les travaux actuels sur le développement des procédés laser suivent plusieurs tendances :

- La miniaturisation : La tendance générale est d'aller vers les procédés de micro fabrication. Tous les procédés macroscopiques sont repensés et transposés pour le microscopique. Cela concerne à la fois les procédés d'assemblage, les procédés d'usinage, les procédés de traitement de surface. Cette évolution concerne plusieurs secteurs industriels ;
- Les procédés hybrides : Ils bénéficient de la synergie du laser et des procédés conventionnels pour accroître les performances et la souplesse des procédés *mono technologie*. La principale application concerne le soudage, notamment les secteurs automobile et tôlerie ainsi qu'à plus long terme le secteur aéronautique ;
- La modélisation et la simulation des phénomènes d'interaction laser-matière ;
- Le contrôle qualité *in situ* : Les contraintes actuelles en terme de qualité et productivité imposent de plus en plus la mise en place d'un système de contrôle par des techniques d'imagerie, acoustiques ou spectroscopiques.

Micro usinage

Les progrès récents sur les sources lasers (Nd/YAG pompés par diode à durée d'impulsion nanoseconde, laser Nd/YAG triplé ou quadruplé, laser picoseconde, laser femtoseconde) laissent entrevoir des potentialités très attractives pour le marché du micro usinage, en terme de faisabilité, qualité d'usinage, flexibilité et rapidité d'exécution. Le marché du micro usinage croît progressivement depuis 5 à 6 ans. Malgré le faible nombre de sous-traitants, des applications niches s'affirment dans de nombreux secteurs de l'industrie : micro mécanique, MEMs, électronique, micro électronique, emballage médical, emballage cosmétique, fabrication de prothèse médical, instrumentation à vocation industrielle ou scientifique, capteur, automobile, aéronautique. La précision et le caractère sans contact de l'usinage laser ouvrent la voie vers de nouvelles applications jusqu'à alors inaccessibles en terme de dimensions, rapport de forme ou non-dégradation de la cible. Le laser permet de micro usiner les matériaux ultra durs comme les matériaux ultra fragiles. Les lasers à impulsions ultra brèves apportent les possibilités d'usiner n'importe quel matériau d'une part et de minimiser les effets collatéraux d'autre part. Le micro usinage laser est une des technologies clef pour le futur. Il est en concurrence directe avec la micro électroérosion et l'usinage mécanique de précision.

Perçage haute cadence

L'évolution des sources et des équipements opto-mécaniques permet de répondre efficacement aux exigences industrielles en terme de perçage à haute cadence. Le couplage de laser à très hautes cadence (10-100 kHz) avec un miroir polygonal en rotation rapide desservant alternativement plusieurs têtes à déflexion optique permet d'atteindre des cadences de perçages jusqu'à 250 000 trous par seconde sur des films minces (polymère, feuillard métallique ou papiers, 10-200 μm d'épaisseur) et pour une largeur de laize jusqu'à 120 cm. Le principal fournisseur de système clef en mains est allemand. Cette technique récente est amenée à subir un fort développement et une large diffusion dans les années futures. Les applications concernent l'emballage alimentaire, le papier à cigarette et la réalisation de filtres.

Découpe facile/ Pré découpe

La découpe reprend le principe du perçage haute cadence en terme de conception mécanique avec les deux différences suivantes : les spots sont jointifs et se recouvrent de manière à former un sillon continu d'une part et la découpe n'affecte qu'une partie de l'épaisseur du film de manière à faciliter une rupture (déchirure) propre et orientée du film d'autre part. Cette technique garantit l'étanchéité du film et dans le cas d'un film métallique ou semi-métallique elle garantit également l'opacité du film. Les potentialités de cette technique laisse entrevoir une forte expansion dans les années futures. Les principales applications concernent l'emballage alimentaire et l'emballage médical.

Micro lithographie

Les enjeux actuels concernant la micro lithographie sont les suivants : amélioration de la technologie à 193 nm pour atteindre les 90 nm de résolution à court terme, réussir le passage à la technologie à 157 nm à moyen terme (2005-2006) et développer la technologie EUV (essentiellement 13,5 nm) à long terme (horizon 2010). Cette dernière nécessite de revoir complètement le principe des *steppers* actuels (composants optiques, sources EUV, matériaux). La région de Grenoble accueille un pôle d'excellence dans le domaine (ST Microélectronique, Philips ...). Compte tenu des volume de production l'enjeu industriel est considérable.

Marquage interne

Le marquage interne consiste focaliser le faisceau laser sous la surface d'un matériau transparent afin de créer un ensemble de défauts ou bulles, lesquelles diffuseront la lumière et donneront un contraste. Ce type de marquage connaît un fort développement actuellement. On distingue deux types d'applications.

La première application concerne le marquage d'objet décoratif où le marquage est esthétique, visible, pérenne et de grande dimensions (quelques cm). Pour cela on utilise des lasers Nd/YAG à durée d'impulsion nanoseconde.

La seconde application touche un marché potentiel bien plus important et moins visible pour le grand public, il s'agit de la lutte contre la contre-façon et contre les marchés parallèles. Le marquage est ici presque invisible car il est de dimensions inférieur au mm ou au dixième de mm. La modification dans la matière peut être physique (éclats, bulles) ou simplement un changement d'indice optique très localisé. Les lasers à durée d'impulsion nanoseconde seront prochainement remplacés, pour les applications les plus critiques, par les lasers femtoseconde, dont la brièveté de l'impulsion permet de réduire la taille du motif élémentaire et de réduire la

zone affectée. Ce marché est émergent, plusieurs grandes sociétés du packaging médical ou cosmétique s'y intéressent. Aucune application n'est connue à ce jour au niveau national.

Usinage interne

Cette technique reprend le principe du marquage interne pour cette fois-ci usiner sous la surface. Le matériau traité (transparent) est ensuite exposé à un solvant chimique qui vient dissoudre sélectivement les zones traitées au laser. Certains verres ont été élaborés spécifiquement pour ce type d'application. Il existe au niveau mondial une intense activité de recherche autour de ce procédé. Le laser utilisé est un femtoseconde. Les applications potentielles concerneraient l'optique (guide optique) et la micro fluidique.

Une autre application concerne la chirurgie réfractive intrastromale (ophtalmologie). L'idée est de remplacer le micro kératome utilisé dans la technique opératoire du LASIK (opération consistant à changer la courbure de la cornée au laser Excimère pour traiter la myopie ou l'hypermétropie) par un kératome laser capable de découper un capot d'épaisseur contrôlée. Cette technique utiliserait un laser femtoseconde (il n'y a pas de dissolution avec un solvant après le traitement laser). Les bulles de matière vaporisée dans la cornée diffuse vers la surface car la cornée est poreuse. Ce thème fait l'objet de recherche sur les Universités de Bordeaux (ainsi que sur trois autres sites dans le monde). Il faut savoir que l'enjeu est énorme puisque le LASIK est la première opération chirurgicale au monde. À terme, le but est de remplacer également le laser Excimère pour changer la courbure de la cornée en usinant la matière sous la surface sans ouvrir la cornée.

Marquage froid

Le marquage froid désigne le marquage de matière plastique ou élastomère par laser à rayonnement ultraviolet. Contrairement au marquage laser conventionnel (CO₂ ou Nd/YAG), le marquage froid ne brûle pas la matière et les changements de coloration proviennent pas d'un effet thermique mais d'un effet photochimique (avec ou sans gravure). Le terme *froid* désigne donc l'absence d'effet thermique. Cette technique récente utilise des lasers ND/YAG triplés ou quadruplés (355 et 266 nm). Cette technique a subi un essor important en quelques années. Les marchés porteurs sont la personnalisation de carte à puce ou encore le marquage d'insert plastique pour le médical.

Marquage couleur

Dans le cas du marquage laser conventionnel, deux techniques prédominent : la gravure et la carbonisation, pour lesquelles le processus est essentiellement thermique. L'énergie lumineuse est convertie en chaleur, il y a fusion puis vaporisation. La carbonisation (aspect brûlé) traduit la dénaturation du matériau cible sous l'effet de cet échauffement. Le marquage est classiquement brun ou noir. Le contraste de couleur entre la couche gravée et une éventuelle sous-couche de couleur différente peut donner l'aspect d'un marquage couleur, mais cette technique est limitée et peu souple (marquage de tableau automobile, marquage de plaque métallique peinte, marquage de câble aéronautique à double gaine, marquage d'étiquette papier noire sur fond blanc ...).

Le concept du marquage couleur est récent, il s'agit de marquer en couleur sans dénaturer le matériau, sans en altérer la fonctionnalité et sans utiliser le principe de la cible bicouche. Plusieurs techniques ont vu le jour. Le choix de la technique dépend essentiellement de la nature du substrat.

La première technique consiste à fondre et à fritter sur le substrat une couche de poudre de céramique. Cette technique est mise en œuvre par la société CERLASE (87), elle utilise un laser IR.

La deuxième technique consiste à projeter une poudre spécifique (encre) adéquate sur un substrat organique, textile ou papier et à fondre cette poudre sur la cible. Cette technique est mise en œuvre par la société ES TECHNOLOGY (33), elle utilise un laser IR.

La troisième technique consiste à provoquer un changement de coloration sur un polymère par changement de conformation des chaînes polymériques ou changement de pigmentation d'un additif à 1 ou 2 % (oxyde métallique dont le degré d'oxydation définit la coloration). La majorité des additifs ne donne qu'une seule couleur sous l'effet du laser. Certains additifs permettent d'obtenir jusqu'à quatre couleurs différentes sous l'effet d'un rayonnement laser, la couleur obtenue est fonction des paramètres laser. Les couleurs accessibles sont ternes (vert, marron, brun, gris). C'est une technique d'avenir qui sera de plus en plus utilisée, elle utilise généralement un laser Nd/YAG triplé ou quadruplé (UV). En France la société GEMPLUS met en œuvre cette technologie, entre autres.

La quatrième technique consiste à utiliser l'échauffement du faisceau laser pour provoquer la migration d'un pigment et augmenter localement sa concentration. Le pigment initialement en faible concentration dans le polymère ne donnait pas de coloration spécifique, mais une fois concentré le pigment confère au polymère une coloration spécifique. C'est une technique d'avenir qui sera de plus en plus utilisée, elle utilise un laser IR ou UV selon les cas. En France la société GEMPLUS met en œuvre cette technologie, entre autres.

La cinquième technique consiste à créer une couche d'oxydes métalliques à la surface du substrat métallique par traitement laser à l'air. La couche étant d'épaisseur submicronique en lui donnant des reflets colorés, dont la coloration est liée à la nature de l'oxyde et à l'épaisseur de la couche, lesquels dépendent des paramètres laser utilisés. Cette technique utilise un laser IR (Nd/YAG). Aucune application industrielle n'est recensée à ce jour.

Marquage 3D

Le marquage 3D consiste à graver sur plusieurs couches. Chaque passe laser correspond à une épaisseur donnée de matière ablatée ou vaporisée, en superposant les passes, il est possible de graver sur plusieurs niveaux et de réaliser des gravures 3D. L'émergence de ces techniques a été possible grâce au développement de logiciels dédiés (par exemple *type3*).

Usinage 3D

L'usinage 3D est la transposition de la découpe à plat (2D) à la découpe tridimensionnelle (découpe de forme gauche, découpe de chanfrein ...). Là encore l'émergence de cette technologie est liée au développement des machines industrielles. Les principaux fournisseurs sont allemands. De nombreux sous-traitants français en sont équipés aujourd'hui. Le nombre de machine de découpe laser 3D en France croît rapidement pour répondre au besoin du marché. Le principal secteur est celui de la tôlerie fine.

Prototypage rapide

Le prototypage rapide concerne principalement la projection de poudre, le frittage laser et la photo polymérisation. Le développement des connaissances scientifiques a permis l'émergence d'une réelle activité industrielle et l'apparition de centres de compétences (industriels ou laboratoires). Plusieurs centres de compétences sont identifiés (à Nancy, à

Limoges, à Marseille). Un intégrateur français s'est même positionné avec succès sur le marché. Cette nouvelle application du laser est en fort développement.

Soudage

Les quelques laboratoires, et centres techniques dans une moindre mesure, spécialisés dans le soudage laser travaillent activement sur la modélisation du soudage laser (bain fondu, *keyhole*, instabilités...) et des phénomènes connexes (formation de soufflures, fissuration à froid, fissuration à chaud, transformation allotropiques au voisinage du cordon...).

Les connaissances en soudabilité métallurgiques croît d'année en année. Pour chaque métal ou alliage métalliques les hommes de l'art connaissent les limites, les taux d'impuretés tolérés et les conditions standards de soudage laser.

La soudabilité opératoire suit le développement des sources et des systèmes de délivrance de faisceaux. La technologie des fibres optiques a bénéficiée au soudage laser, puisque les fibres optiques permettent d'uniformiser le profil d'intensité et de séparer le faisceaux pour travailler en multispot (longitudinal ou transverse).

Les réels développements dans le domaine du soudage par faisceau haute densité concerne le soudage laser hybride.

Soudage hybride

Il y a encore deux ans, le soudage hybride était une curiosité de laboratoire dont l'avenir et l'intérêt étaient incertains. C'est aujourd'hui un des thèmes les plus prometteurs parmi les procédés laser. Le soudage hybride consiste à associer le laser à un procédé de soudage plus conventionnel (TIG, MIG, MAG, Plasma). Il offre plusieurs avantages majeurs. La puissance du laser pour souder une épaisseur donnée est réduite. Les tolérances d'accostage sont multipliées par deux. La profondeur de pénétration du laser est conservée.

Le soudage hybride ouvre les procédés laser à des secteurs d'activité pour lesquels le laser n'était jusqu'ici pas adapté, par exemple le secteur de la chaudronnerie où les tolérances d'accostage requises par le laser seul sont irréalisables à un coût acceptable.

Le soudage hybride permet également le *raboutage* de tôles de nature différente, ce qui a un intérêt pour le secteur automobile (conception de véhicules hybrides aluminium-acier).

Le soudage hybride est une technologie clef pour le futur.

Rechargement

Le micro rechargement est la transposition du rechargement aux petites dimensions (mm). Il permet la réparation précise de moule d'injection à base métallique. Il permet également de d'appliquer localement un revêtement de surface. De nombreux laboratoires et centres techniques travaillent dans le domaine.

Assemblage de thermoplastiques par laser

Cette technique récente (4 ans) est très intéressante car elle est fiable, esthétique et rapide. De nombreuses applications ont vu le jour au niveau européen. La France est leader dans le domaine au travers des centres laser de Arcueil et Strasbourg dont le savoir-faire fait office de référence. Les travaux actuels portent sur la compréhension du phénomène et sur l'ajout d'additif pour moduler l'absorption des matériaux et sur le contrôle. La mise en œuvre est

bien maîtrisée. Malheureusement, nous n'avons recensé qu'une seule application industrielle au niveau national (réalisation de container ultra propre pour le transport de wafers de silicium en micro électronique par la société INCAM Solutions).

Le laser permet également de sceller des films plastiques entre eux. Les potentialités de cette technique sont intéressantes dans le packaging alimentaire, médicale ou micro électronique. Les diodes laser s'étant révélées inadaptées à un allumage fréquent, cette technique utilise préférentiellement le laser Nd/YAG (cette tendance pourrait évoluer d'ici quelques années avec les progrès sur les diodes).

Traitement de surface par laser

Les traitements de surface par laser sont largement explorés au niveau laboratoire (laboratoire scientifique), quelques applications commencent à voir le jour. La finalité de ces traitements est d'améliorer les propriétés tribologiques des surfaces, les propriétés d'adhésion, les propriétés de résistance à l'usure ou à la corrosion.

Les travaux actuels peuvent se séparer en trois groupes :

- La structuration de surface, en particulier la formation de nano-agrégats. Ces particules physico-chimiques nanométriques présentent des propriétés nouvelles par rapport aux états de la matière conventionnels. Les applications concernent, entre autres la nano-fabrication.
- La modification de surface, pour la refusion d'une surface métallique, la création d'une couche barrière anti-usure ou anti-corrosion sur un métal, la fonctionnalisation d'une surface organique, la transformation superficielle d'une céramique (métallisation de nitrure d'aluminium par exemple).
- Le nettoyage de surface, pour enlever une couche tout ou partie d'une couche polluée. En France, les travaux sont orientés vers la décontamination de déchets nucléaires secondaires par laser Excimère. Quelques travaux concernent le décapage de pièces composites et le décapage de moule d'injection.

Dépôt par ablation laser (Pulse Laser Déposition, dite PLD)

La formation de dépôts par ablation laser est largement explorée au niveau laboratoire (laboratoire scientifique ou industriel), aucune application industrielle n'a réellement percée car les techniques de dépôt CVD sont plus performantes et moins coûteuses en production. Le procédé PLD se révèle en revanche particulièrement pour obtenir rapidement et à moindre coût des dépôts *prototypes* à des fins de recherche et développement..

Dépôt par ablation laser de carbone nanostructuré et nanotubes de carbone

Cette technique consiste à vaporiser, sous vide ou en présence d'un gaz neutre ou réactif, une cible de graphite avec un faisceau de laser Excimère. Cette technique permet d'obtenir divers matériaux à base de carbone, et tout particulièrement les nano-agrégats et les nano-tubes de dimensions et orientation contrôlées. Les applications futures concernent celles de l'émission de champ, c'est-à-dire la fabrication des écrans plats et la fabrication de cathode froide. Pour ce type d'application, les nanotubes de carbones orientés (uniquement obtenus par laser) sont plus efficaces que les nanotubes de carbone amorphe.

Choc laser

Le choc laser peut être mis à profit pour introduire des contraintes résiduelles de compression qui améliorent la tenue à la fatigue en métallurgie. Cette application concerne principalement les secteurs de la métallurgie à haute valeur ajoutée, comme l'aéronautique par exemple.

Formations existantes et emplois attendus par le tissu industriel

Il n'existe pas de réelle coordination entre les différents centres de formation laser. Plusieurs organismes dispensent des formations sur les technologies et procédés laser : universités, centres techniques, IUT, école d'ingénieur (voir annexe partie 2).

Formations initiales

Plusieurs universités proposent des formations professionnelles ou scientifiques en fin de cursus : licence professionnelle, DESS, DEA, Master. Quelques écoles d'ingénieurs proposent une option « laser » en 3ème année. On distingue les formations plus orientées *physique des lasers* et les formations plus orientées *procédés laser* (découpe, soudage essentiellement). Les équipes pédagogiques privilégient la théorie et parfois la pratique de base, peu abordent la pratique sur des machines industrielles.

La maîtrise des technologies et des procédés laser fait appel à des compétences multidisciplinaires : physique des lasers, physique, optique, physique de plasmas, hydrodynamique, mécanique, chimie, thermodynamique. Force est de constater que les équipes pédagogiques ne reflètent pas toujours cette multidisciplinarité.

Compte tenu de la maturité des technologies laser, il est surprenant que l'enseignement sur les technologies et les procédés laser ne soient pas intégrés dans le cursus des écoles d'ingénieurs. Dans la plupart des cas, les jeunes ingénieurs ne connaissent pas 5% des potentialités du laser dans le secteur industriel qui les concerne. Les décideurs de demain ne sont donc informés sur la technologie laser et ses potentialités, hors la mise en place de procédés laser industriellement viables et performants nécessitent une bonne connaissance de la technologie. Une pièce fabriquée « laser » n'est pas pensée de la même manière qu'une pièce fabriquée par usinage conventionnel, hors pour penser « laser » il a dû être formé au laser.

Formations continues

Plusieurs centres lasers proposent des stages de formation liés à la technologie laser. Les thèmes de stages sont variés et couvrent la plupart des besoins industriels. Les centres proposent également des formations *à la demande* et ciblées si nécessaire.

Dans la majorité des cas, l'acquisition d'une machine de découpe ou soudage laser s'accompagne d'une formation *à la conduite de la machine* mais rarement d'une formation *au procédé* telle que celle dispensée par les centres techniques. Ce manque de formation des opérateurs aux procédés conduit généralement à un mauvais choix de paramètres d'usinage et des séquences d'usinages non optimisées. Un mauvais paramétrage sur de la découpe laser est

encore acceptable car le procédé est relativement souple. Un mauvais paramétrage sur une opération de soudage laser nuit fortement à la faisabilité et peut avoir des conséquences dramatiques sur la tenue mécanique et la tenue à la corrosion de l'assemblage. Un effort de sensibilisation sur la nécessité d'une formation procédé s'impose.

Emplois attendus par le tissu industriel

Les emplois concernent tous les secteurs d'activités : automobile, aéronautique, agroalimentaire, bureau d'étude, cadeau d'entreprise, capteur, chimie, chimie fine, décoration, électronique, emballage, environnement, mécanique, optronique, optique, pharmaceutique, photonique, spatial. Les types d'emplois recherchés sont les suivants :

- opérateur
- technicien de maintenance
- technicien *monteur*
- ingénieur *process*
- docteur-ingénieur (R&D)
- chef d'entreprise
- technicien *process*
- ingénieur *physique et développement laser*
- technico-commercial

Recommandations proposées

Valorisation du tissu industriel

- *Soutenir le développement des lasers et des applications liés aux micro technologies. Il est peu probable que la France rattrape son retard au niveau des procédés macroscopiques, par contre le positionnement de la recherche et de l'activité industrielle sur les procédés microscopiques est en train de se jouer maintenant, au niveau européen et au niveau mondial. Compte tenu du potentiel de recherche et de la capacité d'investissement des industries allemandes (et dans une moindre mesure italiennes et anglaises) il paraît crucial de soutenir les efforts de développement français dès aujourd'hui, afin d'aider la filière photonique à se maintenir et à s'imposer comme des acteurs incontournables dans les domaines des procédés microscopiques (recherche fondamentale, recherche appliquée, transfert de technologie, fabrication de laser, fabrication de machine laser, sous-traitance) ;*
- *Soutenir les développements civils au même titre que les développements militaires afin d'accroître les retombées économiques des futurs programmes gouvernementaux (paragraphe 1.3) ;*
- *Soutenir les quelques intégrateurs et fabricants de laser français car ils sont la base du tissu industriel dans ce domaine (Intégrateur = société intégrant un laser dans une machine spéciale pour répondre à un besoin industriel donné) ;*
- *Privilégier le développement de sources qui répondent à un réel besoin du marché (afin de ne pas reproduire les erreurs du passé).*

Transfert de technologies

- *Organiser et coordonner l'action des centres laser et encourager leur complémentarité (complémentarité en compétences et en équipements). Une meilleure coordination conduirait en outre à une meilleure utilisation des fonds publics. Cette coordination pourrait être assurée par le Club Laser et Procédés ou la Commission Nationale d'Optique et Photonique ;*
- *Favoriser les programmes de développement communs entre les centres laser et les utilisateurs ;*
- *Mettre en place des plate-formes technologiques thématiques mi-privé mi-public, regroupant partenaires industriels et scientifiques dans un même lieu, afin de dynamiser le transfert et le développement en commun des technologies lasers, des périphériques, des applications et de la connaissance scientifique. De telles structures seraient complémentaires des divers incubateurs et pépinières d'entreprises, en apportant un support technologique et une mise à disposition de matériels aux jeunes pousses ou jeunes filiales. Les centres lasers existants pourraient s'intégrer dans de telles structures ;*
- *Mettre en place des statuts administratifs et juridiques pour de telles plate-formes technologiques. Les structures existantes à l'heure actuelle se heurtent au manque de cadres administratif et juridique adaptés à une telle activité. Les statuts de ces plate-formes doivent permettre un fonctionnement souple (gestion des contrats, gestion du personnel) pour ne pas entraver la réactivité et l'activité de ces structures.*

- *Encourager l'adossement des centres et plate-formes technologiques à des laboratoires de recherche publics ou privés pour alimenter les connaissances et les savoir-faire de ces centres et plate-formes technologiques au fil des années et maintenir un bon niveau d'expertise.*
- *Modifier les conditions d'éligibilité des aides financières (nationales et régionales) de manière à ce que les centres techniques puissent participer au même titre que les laboratoires de recherche.*

Recherche

- *Soutenir les nouvelles thématiques lasers abordées dans les laboratoires (voir paragraphes 4.2 et 4.3) ;*
- *Valoriser la recherche technologique au même titre que la recherche fondamentale au niveaux des institutions de recherche (Universités, CNRS, laboratoires associés aux grandes écoles). S'investir dans la recherche technologique et les collaborations industrielles ne doit pas être un frein à la carrière des chercheurs, enseignant-chercheurs ou ingénieurs ;*
- *Encourager les laboratoires à collaborer avec les industriels du domaine : fabricants de laser, fabricants de machines, utilisateurs.*

Formation

- *Développer la culture laser au sein des Universités et Ecoles d'ingénieurs en introduisant dans les cursus des cours théoriques et pratiques sur la physique des lasers, les lasers, les procédés laser ainsi que leur mise en œuvre. Une partie de cette formation pourrait être réalisée sur des machines laser industrielles (découpe, soudage, marquage, micro usinage ...) ;*
- *Coordonner et uniformiser les formations laser au niveau national ;*
- *Mettre en place des équipes de formation pluridisciplinaires (paragraphe 5.1) ;*
- *Développer et diffuser des outils pédagogiques à destination du grand public, des lycées, universités et écoles d'ingénieurs. Certains de ces outils existent déjà et sont à promouvoir : Cd-Rom sur la sécurité laser, mallettes éducatives illustrant les propriétés du rayonnement laser par des expériences simples, films illustrant les applications industrielles, diaporamas, exposition grand public « Le laser, un concentré de lumière... ». Citons également le projet (avorté) de la Région Grand Est pour la conception d'un lasermobile, camion contenant plusieurs machines laser pour en illustrer les potentialités au niveau industriel. Ce moyen devait être utilisé dans les établissements techniques et en faisant participer le personnel enseignant à la formation théorique et aux travaux pratiques. La pré étude de faisabilité avait été financée par le Ministère de la recherche et transmis à ce dernier (94-95). Les universités et centres lasers pourraient participer activement à la mise en place et à l'exploitation des ces outils pédagogiques ;*
- *Encourager les industriels qui s'équipent de la technologie laser à suivre une formation au procédé en plus de la formation à la conduite de la machine dispensée par le constructeur (paragraphe 5.2).*

Note : Le Club Laser et Procédés pourrait, si on lui en donne les moyens, participer à la mise en place des actions proposées ci-dessus, en concertations avec la Commission Nationale d'Optique et Photonique, les Universités, Ecoles d'Ingénieurs, Centres Laser et Industriels concernés.

ANNEXES

PARTIE 1 – BILAN DES FORMATIONS AU METIERS DU LASER

Liste non-exhaustive des formations initiales

Niveau	Formation	Lieu	Promotion	Thème
Technicien	Licence Professionnelle <i>Laser, Contrôle et Maintenance</i>	Université Bordeaux 1 (33)	15	Physique des laser, diagnostics, maintenance des lasers
Technicien	DUT Mesure Physiques Option « laser »	IUT Université Bordeaux 1 (33)	15	
Technicien	RETAMEL (Bac +3) 1090 heures	IREPA Laser (67) et INSA (67)	20	Formation homologuée de responsables techniques d'applications métallurgiques laser
240h)	CFAIL 26 jours			Cursus de formation aux applications industrielles des lasers
Technicien	Licence Professionnelle <i>Transformation industrielle – Laser</i>	IUT Creusot (71)		Acquisition des savoirs (210h), savoir-faire (240h) et finalisation des savoir-faire (150h + 14 semaines de stage)
Ingénieur	DESS <i>Laser et Procédés</i>	Université Bordeaux 1 (33)	13	Physique des lasers Interaction laser-matière
Ingénieur	DESS CuCiPhy Option « laser »	Université Bordeaux 1	?	Technico-commercial
Ingénieur	DEA <i>Lasers et Matière Dense</i>	Université Bordeaux 1 (33)	11	Physique des lasers Interaction laser-matière
Ingénieur	DESS <i>Lasers, Matériaux et Milieux Biologiques</i>	CLFA et Université Paris 6 et Université Paris 7	5-10	
Ingénieur	DEA <i>Physique et technologie des Grands Instruments</i>	Université d'Orsay		
Ingénieur	DEA <i>Laser, Métrologie et</i>	Université Paris 13		

	<i>Communications</i>			
	3eme année Option « laser »	Ecole Nationale Supérieure d'Optique de Orsay (Institut d'Optique)	30	Physique des lasers, interaction laser-matière, applications scientifiques et industrielles
Ingénieur	3eme année Option « Optronique »	IMSRA de Caen	15	Physique des lasers, applications

Liste non-exhaustive des formations continues et stages laser

Niveau	Stage	Lieu	Promotion	Thème
Tous niveaux	L'outil laser : principe, fonctionnement et domaine d'utilisation 2 jours	Démonstrateur PYLA Université Bordeaux 1 et CCI Bordeaux (33)	10	Introduction au laser, à la sécurité et aux procédés
Opérateur, technicien	Sécurité laser, normes et habilitation 3 jours	Démonstrateur PYLA Université Bordeaux 1 et CCI Bordeaux (33)	10	Règles de sécurité liées à l'utilisation d'une machine laser, conduites à tenir, évaluation des risques
Opérateur, technicien	Formation à l'utilisation et à sa première maintenance 4 jours	Démonstrateur PYLA Université Bordeaux 1 et CCI Bordeaux (33)	10	Technologies laser Machine laser Maintenance Applications
Cadre	Applications et procédés issus de l'utilisation des lasers – Veille et développement 3 jours	Démonstrateur PYLA Université Bordeaux 1 et CCI Bordeaux (33)	10	Maîtrise du fonctionnement théorique et pratique du laser Veille technologique
Cadre	Accompagnement du besoin laser des entreprises 2 jours	Démonstrateur PYLA Université Bordeaux 1 et CCI Bordeaux (33)	10	Potentialités du laser et aide à la décision
Ingénieur	Stages nationaux de formation sur les lasers à impulsions courtes 5 jours	Université Bordeaux 1 (33)	30	Physique des lasers à impulsions courtes et applications

Ingénieur, technicien	Introduction aux applications industrielles du laser : <i>laser et process industriel</i> 4 jours	Irepa Laser (67)	NC	
Ingénieur, technicien	Introduction aux applications industrielles du laser : <i>le laser dans la mise en œuvre des plastiques</i> 3 jours	Irepa Laser (67)	NC	
Ingénieur, technicien	Assemblage par laser : <i>spécialisation et perfectionnement en soudage laser de matériaux métalliques</i> 2 à 5 jours	Irepa Laser (67)	NC	
Ingénieur, technicien	Assemblage par laser : <i>soudage des alliages d'aluminium par laser</i> 2 jours	Irepa Laser (67)	NC	
Ingénieur, technicien	Assemblage par laser : <i>spécialisation en soudage par laser Yag impulsif de matériaux métalliques</i> 2 à 4 jours	Irepa Laser (67)	NC	
Ingénieur, technicien	Assemblage par laser : <i>le brasage par laser</i> 2 jours	Irepa Laser (67)	NC	
Ingénieur, technicien	Assemblage par laser : <i>soudage des matériaux plastiques par laser</i> 3 jours	Irepa Laser (67)	NC	
Ingénieur, technicien	Mise en œuvre de la découpe laser : <i>spécialisation et perfectionnement en découpe laser</i> 2 à 4 jours	Irepa Laser (67)	NC	
Ingénieur, technicien	Mise en œuvre de la découpe laser : <i>formation d'opérateurs en découpe laser</i> 2 à 4 jours	Irepa Laser (67)	NC	
Ingénieur,	Micro ingénierie par laser	Irepa Laser (67)	NC	

technicien	2 à 4 jours			
Ingénieur, technicien	Les traitements de surface par laser : <i>décapage et préparation de surface</i> 2 jours	Irepa Laser (67)	NC	
Ingénieur, technicien	Les traitements de surface par laser : <i>rechargement</i> 2 jours	Irepa Laser (67)	NC	
Ingénieur, technicien	Contrôle de procédés et analyse de faisceaux laser de puissance 2 jours	Irepa Laser (67)	NC	
Ingénieur, technicien	Réglage et fiabilisation de systèmes à laser industriels 3 jours	Irepa Laser (67)	NC	
Ingénieur, technicien	Caractérisation des matériaux traités par laser : <i>métallurgie générale</i> 4 jours	Irepa Laser (67)	NC	
Ingénieur, technicien	Caractérisation des matériaux traités par laser : <i>métallurgie laser appliquée</i> 4 jours	Irepa Laser (67)	NC	
Ingénieur, technicien	Les techniques de contrôle appliquées par voies optiques et laser 2 à 4 jours	Irepa Laser (67)	NC	
Ingénieur, technicien	Mise en œuvre de la sécurité laser : <i>formation de responsables sécurité laser</i> 4 jours	Irepa Laser (67)	NC	
Ingénieur, technicien	Mise en œuvre de la sécurité laser : <i>mise en œuvre opérationnelle de la sécurité dans les applications industrielles</i> 1 à 2 jours	Irepa Laser (67)	NC	

Ingénieur, technicien	Mise en œuvre de la sécurité laser : <i>information sur les risques laser</i> 1 jour	Irepa Laser (67)	NC	
Ingénieur, technicien	Mise en œuvre de la sécurité laser : <i>formation des médecins et inspecteurs du travail aux risques liés à l'utilisation des lasers</i> 4 jours	Irepa Laser (67)	NC	
Tous niveaux	Sécurité laser 3 à 4 jours	Laser Conseil	NC	
Technicien	Spécialisation en soudage par laser Nd :YAG et diodes	IUT Creusot (71)	NC	
Ingénieur	Les lasers à diodes et le traitement des plastiques	IUT Creusot (71)	NC	Potentialités et comparaison par rapport techniques alternatives
Tous niveaux	Sécurité des installations laser	IUT Creusot (71)	NC	

NC : non communiqué

PARTIE 2 – LES ACTEURS DU LASER INDUSTRIEL EN FRANCE

(LISTE NON-EXHAUSTIVE)

Types	Noms (département)
Fabricant	Cheval Frères, Quantel, Thalès Laser (91), Amplitude Technologies, Amplitudes Systèmes (33), Cilas, Highwave, Sopra <i>Sociétés étrangères</i> : Coherent France, Rofin Baasel France, Trumpf
Distributeur	BFI-Optilas, Laser 2000, Spectra Physics France, Coherent France, Rofin Baasel France, Trumpf, Osiris
Intégrateur	<i>Machine spéciale</i> : ES Technology (33), Lectra (33), Satelec (33), Novalase (33), Laser Cheval (25), Pci (92), Cerlase (87), TSR (33), Technifor, Incam Solutions <i>Machine outils</i> : Amada, Mazak, Bistronic, Rouchaud (87) <i>Sociétés étrangères</i> : Coherent France, Rofin Baasel France, Trumpf
Centre technique	CLFA (91), IREPA LASER (67), Bourgogne Technologies (71), CLAIRE, Institut de Soudure, Institut Saint Louis, PALA (33), Plateforme Femtoseconde/TSI (42), PIALA (13)
Sous-traitant en usinage laser	AAZ Laser (60), AD Coup Littoral (59), Adm Laser (77), Atim77 (77), A.Laser (33), Aldem (08), Amstrutz Levin (90), Aquitaine Découpe (33), Ardre (37), Ares (95), Astf (33), Ateca (82), Atm-Tpc (08), Atom Sodery (08), ATS (51), Avinov (91), Bérard SAS (69), Bretagne Laser (56), Bretagne Oxycoupage (56), Bruder Keller (67), Castel (32), CBS Industries (77), CFPI (08), Chaillous (44), Cisailage Tole St Maur (77), CIM (31), Claux (19), CMIV Jean Guiguet (38), Cobra Laser Tolerie (77), Cognac Laser (16), Collot Technologies (54), CPI TSC (57), CTM (91), CRMA (78), CTA (55), Darraicou (64), Découpe Laser Drouaise (28), De Luca Frères (68), Deertip (28), Duchesne (37), Eskulanak (64), Examéca (64), Extratôle (71), FPC (26), Fabrica (45), France Design (79), Germaneau (86), Goubier (82), Humery Frères (37), Issinox (92), Juy-Catonic (95), Larue (87), Laser Alsace Production (67), Las'Armor (22), Laser 2000 (87), Laser 53 (53), Laser 89 (89), Laser Centre (18), Laser et Technologies de l'Ouest (56), Laser Fusion (58), Laser Jet (68), Laser Production (89), Laser Rhône Alpes (38), Laser Service (87), La Tôlerie Fine (67), Lewis Industrie (77), Lioret (71), Lorient Laser Industrie (56), Lorton (33), Lutrac (57), Macquart (77), MécaChrome (18), MécaLaser (31), Méca Rep (33), MécaTech (40), Métal Mobil (47), MGP (45), Morin (45), Oxyméca (65), Oxymétal Laser Techniques (33 et 87), Perfomat (38), Perrier & Fils (93), Pika (64), Plasmo (53), Relly (88), Renoult (77), Richard-Ducros Ets (30), Robin (85), Rouby (16), Sadela Industrie (07), Safel (91), Satim (79), SCGI (71), SDTI (33), Secatol (86), Sedam (64), Sercs (64), Serelle (64), Serriere (77), Sr

	Chronotole (78), Socam Laser (31), Socromo (01), Soermel (01), Sibi (82), Somain (42), Snop (27), Socam (31), Socomap (86), Sofip (65), So To Cast (33), Sotralinox 10), Sovatol (34), Still Laser (78), Straub (95), STSM (53), Superba (68), Technitole (59), Tm Laser (77), Tramétal (86), Transtechnic (33), Viwamétal (67)
Laboratoires travaillant sur les procédés laser	CELIA (33), LPCM (33), LP3 (13), PHASE (67), Ecole Centrale de Nantes (44), Ecole Centrale de Lyon (69), INSA (67), LTm (71), DIPI (42), Pôle Européen de Plasturgie, LPUB (21), TSI (42)
Sous-traitant en soudage laser	Ares (95), Astf (33), Ateca (82), ATS (51), Bérard SAS (69), CRMA (78), Examéca (64), Extratôle (71), FPC (26), Laser Alsace Production (67), Laser Fusion (58), Laser Rhône Alpes (38), Lorton (33), MécaChrome (18), Safel (91), SCGI (71), Snop (27), Soermel (01)
Sous-traitant en marquage laser	Alphalaser (33), ES Technology (33)
Sous-traitant en micro usinage laser	UV lase (87), Novalase (33), Steec-Apmv (69), Impulse (42)
Sous-traitant en nettoyage laser	Laserblast
Sous-traitant en rechargement laser	Techlase (67), Technogénia (74)
Utilisateurs	Airbus (31 et 44), Aia-DGA (33), Alactel Submarine (62), Alcatel CIT (17), Arcelor, Benteler (89), Bosch, Bourgeois (25), CEA, Cefag (16), Chantiers de l'atlantique (44), Dassault (33), Delacroix (81), EADS LV (78), Eurocopter (13), Faure & Fils (19), Faurecia, Ford (33), Framatome, Garconnet (76), GEC Alstom (17 et 65), Gemplus, Giat Industries (42 et 65), Innodex (87), Intertechnique (78), Jacot (25), Koyo (69), Limes & Rapes-Talabot (81), MBDA (18), Meillor (87), Microturbo (31), Mollertech (59), Nacam (41), Poclain (60), Poujoulat (86), Protac (45), PSA, Renault, Saft (33 et 86), Saipem, Salmson (53), SEB, Semat (17), Siemens VDO (31), Snecma (33), Snecma Moteurs (91), Serap (53), Socata (65), SolBlank (57), Turboméca (64), Valéo (62), Visteon (62), Wagon (23), Ziemann-Secathen (67)
Fabricant de composants ou consommables	Air Liquide, Thalès Laser, Amplitude Technologies, Quantel
Maintenance	Industrial Laser Partner (87), MyaLaser (91/87)

Sources : Usine Nouvelle (2003), ASTF ...

PARTIE 3 – QUELQUES CHIFFRES SUR LE MARCHÉ DU LASER

LE MARCHÉ DU LASER EN GENERAL :

Répartition du marché du laser en 2002 : 30 000 lasers pour l'usinage de matériaux, 6 000 pour la recherche fondamentale, 10 500 pour le médical, 33 000 pour l'instrumentation, 12 500 pour la métrologie et le contrôle, 8 500 pour l'appareillage de bureautique.

LE MARCHÉ DU LASER POUR L'USINAGE DE MATERIAUX :

Part du laser sur le marché de la machine outils : 10%

Nombre de sources recensées dans le monde pour l'usinage de matériaux en 2002 : 195 000 lasers.

Hauteur du marché du laser et répartition : Le marché du laser représente 4 milliard d'Euro en 2002 (prévisions : 10 milliard d'Euro en 2010), dont 50% pour la découpe et le soudage, 30% pour le marquage et 15% pour le micro usinage. Les applications concernent pour 50% les applications macro et 50% les applications micro. La tendance est à augmentation des applications du micro usinage.

Répartition géographique des lasers pour l'usinage des matériaux en 2002 :

Europe	40%
Amérique	25%
Japon	20%
Autre	15% (Taiwan, Chine, Corée ...)

Marché mondial pour l'usinage de matériaux en 2002 :

Machines outils (32 milliard d'Euro)

Laser (2,5 milliard d'Euro) dont

Yag <100W	25%
Yag >200W	7%
Excimère	23%
Diode	1%
CO2 <500W	7%
CO2 >500W	37%

Taux de croissance du marché du micro usinage laser :

Période 2002-2006	20%/an
Période 2006-2010	14%/an

Sources : Laser Focus World Janvier 2003, Optech Consulting AG

7.7

DOCUMENT D'ANALYSE **SUR LA** **STEREO LITHOGRAPHIE (SL)**

(Annexe au chapitre 7.2.2)

**Réponses aux questionnaires sur la stéréolithographie fournies par Serge
MONNERET**

1) La recherche académique

En dehors de Nancy, existe t-il d'autres laboratoires publics en France travaillant sur ce thème de recherche?

Actuellement, il existe un autre centre qui y travaille indirectement, à Limoges. Il s'agit du SPCTS (Science des Procédés Céramiques et de Traitements des Surfaces), laboratoire de recherche, et du CTTC (Centre de Transfert de Technologies des Céramiques), qui développent ensemble un procédé de stéréolithographie de céramiques. Ils utilisent une machine commerciale de SL vendue par l'ex-société nancéienne Optoform, rachetée en 2001 par le géant américain 3D Systems de la SL, en position de quasi-monopole en SL (voir plus loin). Leur principale activité concerne le développement de matériaux chargés en céramiques pour la SL, puis les techniques de frittage des objets obtenus, qui conduisent aux objets finaux en céramique "pure". Le CTTC souhaiterait maintenant développer son activité de prototypage rapide (PR) de céramiques par SL en s'ouvrant sur la microSL.

CTTC (associé au SPCTS, UMR 6638)

Ester Technopole - BP 6915

87069 LIMOGES Cedex

Tél.: 05 55 42 61 50 - Fax: 05 55 42 61 55

email: cttc@ceramic-center.com

site: www.ceramic-center.com

Machines : Optoform

Matériaux : formulations céramiques pour la SL, propriété CTTC/SPCTS.

Prochainement, il est prévu qu'un procédé de microSL soit développé à Marseille, par l'Institut Fresnel, qui soit compatible avec les matériaux développés à Limoges. Il s'agit donc d'une collaboration entre ces deux centres qui devrait permettre de développer à

Marseille une machine spécifique de microSL UV pour des applications en biophotonique (constitution d'une plate-forme intégrant des procédés de microscopies optiques spécifiques pour la biologie cellulaire, avec des technologies de microfluidique 3D, pour lesquelles la microSL sera un point fort). Ce projet repose en grande partie sur ma mutation à l'Institut Fresnel, qui devrait être effective au 1^{er} septembre prochain.

Institut Fresnel (UMR 6133)

ENSPM, Domaine universitaire de Saint-Jérôme

13397 Marseille Cedex 20

Tél.: 04 91 28 80 49 (Hervé Rigneault, responsable plate-forme biophotonique)

Fax: 04 91 28 80 67

Machines : machine prototype de microSL prévue en 2003-2004.

Matériaux : formulations céramiques pour la microSL, développées par le SPCTS (Limoges)

Parmi les activités de Nancy, on trouve l'application de la SL aux procédés chimiques, en collaboration avec le LSGC (Laboratoire des Sciences du Génie Chimique, UPR 6811 CNRS). Plusieurs actions sont déjà menées dans ce sens, qui consistent à fabriquer des prototypes de distributeurs et d'échangeurs thermiques aux géométries innovantes, pour valider des modèles mis au point au LSGC. Un autre domaine important conduit par Serge CORBEL consiste à utiliser la SL pour les applications médicales, et en particulier la fabrication de prothèses. Plus généralement, il travaille sur les matériaux chargés pour de nouvelles applications de la SL. L'optique est relativement peu concernée par ces thèmes.

Par contre, l'activité que je menais jusqu'à présent, centrée sur le développement de procédés pour les micro et nano technologies, est basée sur des procédés optiques (photopolymérisation par ondes évanescentes pour les applications nano, conversion haute d'images visibles en UV par optique non linéaire pour la mise au point d'un procédé de microSL dynamique UV). Je reviendrai plus loin sur l'apport de l'optique dans la microSL.

Département de Chimie Physique des Réactions (UMR 7630)

ENSIC-INPL, 1 rue Grandville, BP 451

54001 NANCY cedex 1

Tél.: 03 83 17 51 14 (Serge CORBEL, responsable de l'équipe de SL)

Fax: 03 83 37 81 20

Machines :

- 1 machine de SL prototype avec laser YAG triplé
- 1 machine de SL prototype avec laser argon UV pour matériaux chargés
- 2 machines prototypes de microSL
- 1 banc expérimental de microSL UV
- 1 banc expérimental de "nanoSL" par ondes évanescentes

Matériaux : formulations développées au laboratoire surtout (microSL et matériaux chargés)

Par ailleurs, une activité de recherche concernant la microfabrication par photopolymérisation initiée à deux photons a été développée à Grenoble, au sein du

Laboratoire de Spectrométrie Physique, sous l'impulsion de Patrice BALDECK, à partir de 2001.

Cette activité à débouchée sur un équipement, maintenant opérationnel, permettant de réaliser des pièces d'un volume inférieur au cm^3 et uniquement avec des matériaux polymères.

Laboratoire de Spectrométrie Physique (UMR 5588)
140 Avenue de la Physique - BP 87
38402 Saint Martin d'Hères - FRANCE
Téléphone (33) 04 76 51 47 82 (Patrice Baldeck)
Fax (33) 04 76 63 54 95

Enfin, on trouve des machines de SL de 3D Systems (SLA) dans différents centres de transfert de technologies, enseignement ou recherche, pour des activités qui ne concernent pas le développement du procédé en tant que tel, mais qui tournent autour du PR.

CESTI / SupMéca Toulon

Maison des technologies
Place Georges Pompidou
83000 Toulon

tel : 04 94 03 88 00

fax : 04 94 03 88 04

Machine : SLA 250-40 (3D Systems), laser HeCd

Matériaux : résine époxy Cibatool 7150

CRSA – CREATE

Centre de Recherche SA, groupe Ecole Centrale de Paris

Grande voie des Vignes

92295 CHATENAY MALABRY

Tél.: 01 41 13 15 67 - Fax: 01 41 13 14 18

email: crsa@ecp.fr

site: www.ecp.fr

Machine SLA

Ecole Centrale de Nantes

71, rue de la Noë - BP 92101

44321 NANTES Cedex 3

Tél.: 02 40 37 16 00 - Fax: 02 40 37 69 30

email: Alain.Bernard@irccyn.ec-nantes.fr (son avis sur la SL serait plus qu'intéressant, puisqu'il était jusqu'à peu président de l'AFPR)

site: www.ec-nantes.fr

Institut Supérieur des matériaux du MANS

44, avenue F. A. Bartholdi

72000 Le Mans

Tél.: 02 43 21 40 00 - Fax: 02 43 21 40 39
email: lnivanen@ismans.univ-lemans.fr
site: www.univ-lemans.fr
Machine : SLA 250

Comment se situe la recherche en France dans ce domaine, comparativement aux autres pays Européens, aux US, au Japon, ...?

Au niveau mondial, il existe de plus en plus d'universités ou de centres de recherche qui s'intéressent à la SL au sens large depuis quelques années. Une liste relativement complète peut être donnée ci-dessous. En italiques dans la liste, les groupes de recherche qui selon moi produisent des résultats très intéressants, voire en pointe, sur des aspects innovants concernant le matériau ou le procédé de SL. Les autres utilisent des machines SLA commerciales de 3D Systems, pour des études d'optimisation de fabrication, de méthodologies de conception, de conceptions de projets techniques, de logiciels, etc.

Continent américain (en fait, il n'y a que des centres américains)

- ✎ [Embry-Riddle Aeronautical University](#) : Undergraduate students have access to a stereolithography machine for engineering projects.
- ✎ [Penn State University](#) : *Uses SLA, LOM and FDM processes. Work is centered on rapid tooling processes for die compaction and powder injection molding tooling. MicroSL de céramiques.*
- ✎ [San Diego State University](#) : stereolithography services.
- ✎ [University of Central Florida](#) : A multitude of CAD/CAM, software packages are available as well as three types of rapid prototyping technologies: stereolithography, Thermojet, and FDM.
- ✎ [University of Kentucky](#) : *The Center for Robotics and Manufacturing Systems (CRMS) provides instruction in RP and related technologies as well as technological support for industry.*
- ✎ [University of Manitoba](#) : They've recently established a Rapid Prototyping System Research Laboratory which has SLA and ancillary equipment. The focus is on integration of the design and manufacturing process, also time optimization.
- ✎ [University of Massachusetts, Lowell](#) : Rapid prototyping and tooling research is being conducted at the 3D Systems Stereolithography Rapid Tooling Application Center.
- ✎ [University of Michigan](#) : *Stereolithography of Ceramics. Les concurrents directs de Limoges, mais pas meilleurs.*
- ✎ [University of Texas at El Paso](#) : The W.M. Keck Border Biomedical Manufacturing and Engineering Laboratory at UTEP utilizes stereolithography and fused deposition manufacturing technologies to fabricate anatomical structures for research and surgical modeling applications.
- ✎ [Atlanta, Georgia Institute of Technology, Manufacturing Research Center](#) : machines SLA, SLS, stéréolithographie sur technologie silicium pour la microfluidique.

Europe :

- ✎ [Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne \(Suisse\)](#) : *Procédé de microSL le plus avancé. Mon concurrent direct (Arnaud Bertsch, issu du DCPR), meilleur sur la*

résolution, mais limité aux polymères pour l'instant (il travaille aussi sur les matériaux chargés depuis peu).

☞ [Helsinki University of Technology \(Finland\)](#)

☞ [Institute on Laser and Information Technologies, Russian Academy of Sciences \(Russia\)](#) Department of Informatics, Computer Equipment and Automatization (IPLIT RAN). Site discusses Russian developments in SLA.

☞ [Katholieke Universiteit Leuven \(Belgium\)](#) Researching selective laser sintering (SLS) process and working on stereolithography coating techniques.

☞ [Loughborough University \(UK\)](#) The Rapid Manufacture Research Group of De Montfort University moved to Loughborough University's Wolfson School of Mechanical and Manufacturing Engineering at the end of 2001.

☞ [Royal Institute of Technology \(Sweden\)](#) Researching selective laser sintering (SLS) and stereolithography processes, especially the use of SLS tooling for gravity die casting of prototypes and short production runs.

☞ [Technische Universität München \(Germany\)](#) *Researching micro-stereolithography processes. (In German.)*

☞ [Universidade Nova de Lisboa \(Portugal\)](#) : Portuguese Rapid Prototyping Network: A merger of competencies providing RP Services for Industry. Models produced using: LOM, DMLS, SLS-Plastic, SLS-Metals, and Stereolithography. (in Portuguese)

☞ [Universität Passau \(Germany\)](#) FORWISS project for the *development of micro-stereolithography*.

☞ [Universität Stuttgart \(Germany\)](#) Development of materials and processing for stereolithography, and rapid tooling with SLS.

☞ [University of Nottingham / Innovative Manufacturing Centre \(UK\)](#) : SLA, LOM, FDM, Actua and Z Corp. technologies are available for design & build work.

☞ [University of Patras \(Greece\)](#) : Research on rapid tooling, new materials and modeling of RP processes. Owns 3 types RP machines (SLA, LOM and FDM).

☞ [University of Sussex \(UK\)](#) *Research on micro-stereolithography and materials. The potential aim is the integration of medical imaging with manufacturing technologies within a clinical environment. Procédé de microSL UV dynamique en développement.*

☞ [University of Warwick \(UK\)](#) : The Rapid Prototyping & Tooling Centre's research is directed towards low cost injection mold tools and optimization of selective laser sintering-based tooling processes. Several rapid prototyping technologies including SLA, SLS, 3DP, Solidscape, LOM and MJM are provided for industry directly by the RP & T Centre or in collaboration with BMW.

Asie :

☞ [Hong Kong Polytechnic University \(Hong Kong\)](#) : Research, Training and University / Industry collaboration on a wide range of Rapid Product Development processes.

☞ [Osaka University \(Japan\)](#) *Research areas include development of 3D photonic crystals by stereolithography and freeform fabrication of intermetallics by reactive rapid prototyping. Groupe très innovant, avec actuellement une activité de SL à deux photons.*

☞ [Tsinghua University \(China\)](#) Developing multi-process RP systems offering change-over ability among fused deposition modeling (FDM), selective laser sintering (SLS) and stereolithography systems.

Afrique :

¶ [Technikon Free State \(South Africa\)](#) : Offers stereolithography (SLA), selective laser sintering (SLS) and Solidscape technologies.

Une équipe du Département des Microtechniques de l'EPFL (Ecole Polytechnique de Lausanne) développe un procédé de microstéréolithographie qui permettrait de fabriquer des micropièces avec une résolution de 5 à 10 μm . Le procédé mis au point est relativement comparable à celui développé à Nancy, et utilise un masquage dynamique pour la fabrication des couches ; l'un des responsables suisses du projet a par ailleurs effectué sa thèse au sein du laboratoire de l'ENSIC. L'EPFL aurait collaboré avec la société PROFORM pour développer un prototype de machine exploitant le procédé. Outre cette collaboration, l'EPFL fait état d'un partenariat avec sa compatriote RPC (RAPID PROTOTYPING CHEMICALS), rachetée par l'américain 3D SYSTEMS.

Karlsruhe (Allemagne) abrite deux groupes actifs dans le domaine de la fabrication de micropièces :

¶ le Centre de Recherches en Technologies de l'Information (FZI - Forschungszentrum Informatik) mène un projet concernant la fabrication de microsystèmes par stéréolithographie, en utilisant des masques dynamiques. Selon les chercheurs du FZI, le procédé convient à la fabrication de dispositifs à l'échelle centimétrique, avec une résolution latérale qui serait inférieure à 10 μm ;

¶ le Centre de Recherches de Karlsruhe (FZK - Forschungszentrum Karlsruhe) propose un procédé de fabrication « indirecte » de micropièces en céramique (le procédé RPPC -Rapid Prototyping Process Chains) qui utilise dans sa première étape le procédé de microstéréolithographie de la société MICROTEC.

Les chercheurs du groupe IIRS (Informatics and Image Recognition Systems) de l'Université du Sussex ont travaillé à un procédé de microstéréolithographie utilisant le masquage dynamique. Les micropièces fabriquées ont des dimensions comprises entre 50 μm et 50 mm, avec des détails de 5 μm , et une résolution qui serait inférieure à 1 μm (je suis très sceptique sur la manière de définir cette résolution). Le Professeur Chris Chatwin, du groupe IIRS, détient un brevet en nom propre.

Au niveau européen d'autres projets traitant de microstéréolithographie sont en cours, principalement en Allemagne. Le Laser Zentrum d'Hannovre coordonne le projet MIPRO (Micro rapid PROtotyping), qui rassemble 8 partenaires (allemands, britanniques, finlandais, italiens et suisses). Une machine permettant de travailler en microstéréolithographie ou en SLS par un simple ajustement « manuel » a été développée.

Le projet FORWISS, coordonné par l'Université de Passau, a pour objectif de développer une nouvelle technique de microstéréolithographie ; 6 partenaires y sont associés, dont SIEMENS.

Plusieurs autres équipes universitaires sont actives dans le domaine de la microfabrication dans le monde. Les principales sont celles des universités d'Osaka et de Nagoya au

Japon, qui proposent un procédé de microstéréolithographie : celui-ci permet le durcissement des couches à l'intérieur de la solution de photopolymère.

Sans vouloir être négatif, il me semble que nous sommes en perte de vitesse en France, sauf au niveau des matériaux céramiques. Les japonais sont les rois de la résolution extrême, les suisses et les allemands sont très forts en procédés et ont bénéficié d'aides de fournisseurs de résines (RPC surtout, depuis passé chez 3D Systems). Selon moi, notre atout en France repose sur le savoir-faire en matériaux chargés pour la SL, qu'il faudrait continuer à développer en cherchant de nouvelles applications sur lesquelles les industriels ne se sont pas encore positionnés, comme la microfluidique peut-être, ou la réalisation de (micro)composants 3D actifs. Je montrerai plus bas que la concurrence la plus rude provient effectivement de l'industrie dès lors qu'il s'agit de réaliser des prototypes fonctionnels de "grande" taille. Mais l'émergence de sociétés proposant des procédés de microSL laisse penser qu'il faut s'attendre à des nouveautés très prochainement dans ce domaine là aussi.

Quels sont les axes de recherche:

De ces dernières années, avec les acquis majeurs obtenus :

Pour moi, il y a deux axes de recherche majeurs, et un troisième un peu moins important, car moins innovant au niveau scientifique.

Le premier concerne la SL pour la fabrication d'objets fonctionnels. Il s'agit avant tout d'un axe de recherche concernant les matériaux, mais aussi les procédés, puisque les matériaux utilisés dans ce cas sont souvent des matériaux pâteux composés de poudre (céramique, métallique) et de liant (résine photosensible de SL), qui ne sont pas compatibles avec les systèmes conventionnel de mise en couche des machines de SL. On a ainsi pu voir dans les salons spécialisés dans le domaine du PR des pièces métalliques ou céramiques réalisées par SL, puis frittées, et utilisées comme prototypes fonctionnels (Optoform, CTTC). Le DCPR et le CTTC/SPCTS sont deux centres de recherche fortement impliqués dans cet axe (alumine, zircone, matériaux biocompatibles pour Limoges, alumine, matériaux biocompatibles, PZT pour composants actifs, à Nancy).

Le second concerne la microSL, qui permet de s'affranchir du problème majeur des technologies issues de la microélectronique (silicium) : ce sont des technologies essentiellement "planaires", qui ne permettent pas la 3D. La microSL nécessite une rupture assez importante avec les principes utilisés en SL conventionnelle, en particulier au niveau de l'étape d'éclairement. Tous les systèmes actuels de microSL développés dans les laboratoires comme en entreprise (MICROTEC) sont basés sur l'utilisation de masques dynamiques à cristaux liquides ou à micromiroirs (système DLP/DMD de Texas Instruments). Les pièces réalisées jusqu'à présent ont un volume typique de quelques mm³ avec une résolution de 5µm (polymère, EPFL) ou 30-50 µm (matériaux chargés, Nancy).

Le troisième "axe" de recherche concerne l'amélioration des qualités des prototypes sans rupture totale du procédé, voire le plus souvent en utilisant des machines commerciales SLA. Il s'agit essentiellement de développement sur les matériaux (époxy principalement) et sur la gestion de la mise en forme. Cette recherche est surtout menée par les industriels, et conduit à des évolutions des machines, mais

sans rupture technologique. Cependant, il n'y a rien à voir entre ce qui est proposé en PR maintenant et ce qui était proposé il y a seulement 5 ans ! (on a à disposition des matériaux proches des principaux plastiques d'injection).

Pour les prochaines années

Je pense que la SL va se tourner essentiellement vers l'industrie de l'outillage rapide, c'est-à-dire vers la réalisation par SL puis frittage de moules prototypes permettant la fabrication de prototypes "bonne matière, bon procédé" de pièces plastiques en petite ou moyenne série. Il s'agit là d'un travail de recherche principalement axé sur les matériaux, avec quelques améliorations nécessaires du procédé au niveau de la mise en couche.

L'autre direction privilégiée est la fabrication rapide d'implants ou de prothèses : ce sont les matériaux qui changent, mais le principe reste le même (développement de matériaux mis en forme par SL puis frittés, avec en plus les contraintes liées à l'aspect clinique).

La microSL (je reprends les conclusions de l'étude de marché que j'ai faite réaliser) devrait s'orienter principalement dans un souci d'application en santé / biotechnologies. Le marché est en forte croissance. Il est concerné aussi bien par les micropièces que par les microsystèmes. Une innovation soutenue est nécessaire en termes de matériaux à utiliser. Ceux-ci doivent être résistants aux agents chimiques et biologiques, et/ou biocompatibles,... La microSL peut apporter des solutions en termes de PR, mais également de fabrication rapide (petites séries ; pièces sur mesure). Le domaine de la microfluidique paraît être un débouché particulièrement intéressant : la capacité de préparer des dispositifs « complexes », avec par exemple des canaux enfouis, est un atout de la technologie. Selon FROST & SULLIVAN, le marché mondial de la microfluidique était d'environ 17 M€ en 1999 ; il serait de quelques 77 M€ en 2002, et pourrait atteindre près de 400 M€ en 2004. A cette date, le marché européen de la microfluidique pourrait ainsi avoisiner 100 M€.

Ces axes de recherche portent-ils plutôt sur les matériaux (résines) utilisés ou sur le procédé lui-même et en particulier sur les procédés d'illumination (précision de positionnement, résolution spatiale, vitesse d'inscription, choix des sources d'illumination (laser ou autres), ...)?

Comme on a pu le voir, les matériaux sont au centre des recherches actuelles concernant les applications de la SL et de la microSL. Par contre, l'optique a sa part dans le développement des procédés, en particulier dans le domaine de la microSL (voire nanoSL bientôt ?), dès lors qu'il s'agit d'initier une réaction de photopolymérisation sur de très petits volumes : la maîtrise des conditions d'éclairement est primordiale (imagerie ou focalisation, résolution spatiale du faisceau incident, diffusion du matériau, propagation dans le matériau, contrôle de l'épaisseur polymérisée), et met en œuvre différentes disciplines de l'optique (propriétés optiques des matériaux, interaction lumière-matière, imagerie, focalisation de faisceaux laser, ajustement des sources optiques aux matériaux et aux applications, etc.).

Y a-t-il des axes de recherche qui ne sont actuellement pas abordés, mais qui seraient fondamentaux pour faire franchir à ces procédés des sauts technologiques majeurs?

La modélisation des interactions lumière-matière qui interviennent lorsque un faisceau laser focalisé balaye la surface d'un matériau composé d'une résine photosensible

fortement chargée en poudre d'un matériau solide, de granulométrie typique comprise entre la longueur d'onde et 10 fois la longueur d'onde, est un problème complexe encore non totalement résolu. Il s'agit d'un problème complexe de diffusion/absorption qui est pour l'instant traité essentiellement de manière empirique, ou à partir de modèles dédiés à des conditions de diffusion lumineuse dans des milieux peu chargés (plusieurs études ont été menées au DCPR). Une amélioration me semble maintenant essentielle pour une progression significative de la résolution en SL ou microSL de matériaux chargés, vu les dernières évolutions technologiques des procédés dans ce domaine.

2) La recherche industrielle

Existe t-il des fabricants français de bancs de prototypage rapide par stéréolithographie?

Non, pas à ma connaissance.

Quels sont les principaux fournisseurs européens ou mondiaux?

Je donne déjà la liste des sociétés qui fournissent des procédés de SL dans le monde :

[Aaroflex, Inc.](#) Licensee of Dupont and Teijin Seiki developed technology. Aaroflex seems to have become inactive recently.

[Autostrade RP Systems \(Japan\)](#) Manufactures the E-Darts™ low-cost stereolithography system.

[CMET \(Japan\)](#) CMET was founded by Mitsubishi, but was purchased in 2001 by Teijin Seiki which melded it with their other RP operations.

[D-MEC \(Japan\)](#) D-MEC was founded by SONY and Japan Synthetic Rubber Corp. (JSR). Much of the development work has been carried out in Singapore. The company also acts as a service bureau. The products are sold in the US by SONY.

[Denken Engineering \(Japan\)](#) Bench-top stereolithography. [In June, 2001, the company introduced a system using [refrigerative stereolithography](#) technology developed by the University of Tokyo Design Engineering Lab. Supports aren't needed because each layer of photopolymer is solidified by freezing.]

[Fockele and Schwarze \(Germany\)](#) The company's recent emphasis is to provide stereolithography systems for university and industrial laboratories engaged in process research.

[Meiko \(Japan\)](#) Targeted at the Japanese jewelry market.

[microTEC \(Germany\)](#) Offers manufacturing services using stereolithography-like technologies for producing very small objects and systems. Capable of batch fabrication rates to hundreds of thousands of parts per hour.

[OptoForm LLC](#) A joint venture between 3D Systems and DSM Somos announced in March, 2002 to exploit technology developed in France and purchased by 3D Systems in 2001. The technology is based on photopolymerizable paste materials and is intended for the production of parts and tools in ceramics, metals and composites.

[Sony Precision Technology America, Inc.](#) The company introduced stereolithography systems produced by its D-MEC subsidiary to the US market starting in May, 2003.

[3D Systems](#) World's largest producer of rapid prototyping systems and the first company to provide commercial products.

Ces sociétés peuvent se classer en deux groupes : celles qui permettent de générer des procédés pour le PR "conventionnel", et celles qui se lancent dans le domaine du PR pour les microtechnologies. Je vais revenir sur leur description ci-après.

Pour la SL "conventionnelle" (pièces de taille centimétrique) :

Les machines de type SLA de 3D Systems (USA) sont en situation de quasi monopole sur la technologie de SL. La société a été créée en 1986 par Charles Hull, dépositaire des premiers brevets sur la technique de stéréolithographie (à noter qu'un brevet français avait été déposé quasiment simultanément à partir de recherches pilotées par le DCPR - Brevet Français n° 84 11 241, J.C. André *et coll.*) . Elle est aujourd'hui le leader du marché mondial du PR, servant 80 pays avec des implantations aux Etats-Unis, au Royaume-Uni, en France, en Allemagne, en Italie, en Espagne, à Hong-Kong et au Japon. En 2001, 350 des quelques 1 300 machines de PR vendues dans le monde l'auraient été par 3D SYSTEMS. Le chiffre d'affaires 2001 de la société a atteint environ 120 M€. La société propose aujourd'hui des machines de stéréolithographie, de SLS et des modelers de bureau.

Cette société s'est employée à développer le marché, protéger sa position avec une panoplie de centaines de brevets, et à améliorer en permanence ses machines, mais aussi les logiciels et les matériaux associés. Cette politique générant l'amélioration des matériaux, de la précision et de la finition des pièces produites, a été l'instrument essentiel de l'expansion du marché du prototypage rapide. 3D Systems a ainsi pu acquérir ces dernières années un grand nombre de technologies concurrentes, ce qui la rend extrêmement diversifiée et complète dans le domaine. Dans le cas de la SL, l'année 2001 a été significative de cette politique, avec l'acquisition de la SARL nancéienne Optoform (machine de SL pour la fabrication de pièces céramiques et métalliques), du fournisseur de résines RPC (résines époxy tenant en température), et de DTM (technologie complète du frittage laser direct, avec les matériaux associés, pour 45 M\$). La position privilégiée de 3D SYSTEMS sur le marché du PR est par ailleurs renforcée par son association avec DSM SOMOS (ayant donné naissance à la « joint-venture » OPTOFORM LLC), un des leaders mondiaux dans la production de matériaux photosensibles.

Le portefeuille de brevets de 3D SYSTEMS lui a ainsi permis de verrouiller une bonne part du marché américain du prototypage rapide. Ainsi, lors du rachat de DTM par 3D SYSTEMS, le Département de la Justice américain, en application de la loi « anti-trust », a imposé à 3D SYSTEMS de concéder une licence pour l'Amérique du Nord sur au moins une des technologies détenues par le nouvel ensemble ainsi constitué. Elle a finalement été concédée à SONY (2002) pour la stéréolithographie.

De plus, 3D SYSTEMS a de longue date adopté une politique active de défense de son portefeuille de brevets, comme le montrent les exemples suivants :

- QUADRAX, qui fut en 1990 le deuxième fabricant, après 3D SYSTEMS, à proposer la stéréolithographie, a été attaqué pour contrefaçon des brevets de 3D SYSTEMS, et a finalement été contraint de cesser ses activités en 1992 ;
- Des accords de licence croisés ont été signés en 1998 pour la stéréolithographie avec NTT DATA / CMET (depuis racheté par TEIJIN-SEIKI), ainsi qu'avec SONY, pour la zone Asie-Pacifique (accord complété depuis par la licence sur l'Amérique du Nord) ;
- Un litige est en cours avec TEIJIN-SEIKI, pour contrefaçon d'un brevet japonais de 3D SYSTEMS (ceci pourrait expliquer la cessation d'activité de la société Aaroflex).

Ce qui se passe au Japon est d'ailleurs assez particulier, car au moins 5 sociétés travaillent sur la SL et proposent des machines suivant différentes variantes, mais sur un marché généralement réduit au Japon, pour des raisons que je ne connais pas mais qui semblent liées essentiellement à des aspects de concurrence intra-japonaise et de propriété intellectuelle. En particulier, c'est sur les matériaux employés qu'il y aurait des interdictions d'exporter hors du Japon pour des raisons légales.

La société japonaise MEIKO est ainsi la seule qui commercialise au niveau mondial et indépendamment de 3D Systems une machine de « stéréolithographie de haute précision », distribuée notamment en France par la société MULTISTATION. La LC-510 permet de fabriquer des pièces de 100x100x60 mm, avec des précisions qui peuvent atteindre quelques dizaines de microns. Cette machine est principalement destinée au marché de la bijouterie - joaillerie. MEIKO rencontre des difficultés pour vendre sa machine, qui est notamment concurrencée par les modeleurs de bureau vendus par la société nord-américaine SOLIDSCAPE. Le prix de la machine (120 k€) est une des raisons de ces difficultés.

Le chiffre d'affaires de MEIKO a atteint environ 20 M€ en 2001, pour 140 employés.

Meiko LC-510 : SL de précision pour applications en bijouterie, joaillerie essentiellement.

Laser HeCd, épaisseur de couche entre 30 et 70 μm , typiquement 50 μm

Distributeur en France : MULTISTATION S.A.

BP 80126

35801 DINARD CEDEX

Tel : +33 (0)2 99 16 35 35

Fax : +33 (0)2 99 46 41 41

En Europe, la seule société est donc Fockele & Schwarze (Allemagne), qui produit des systèmes de SL en Allemagne pour des applications de recherche et de services (<http://www.fockeleundschwarze.de/english/index.html>).

Pour la microSL :

Pour ce domaine, dans lequel le marché est encore en phase de mise en place, je suis mieux armé pour répondre précisément car je viens de faire réaliser une étude de faisabilité de création d'entreprise en microSL, intégrant une analyse des procédés concurrents à celui que je développe.

La société allemande MICROTEC, installée à Duisburg, a été créée en 1996. Elle est aujourd'hui la seule à proposer commercialement un système de microstéréolithographie. La presse annonçait en 1998 que MICROTEC souhaitait vendre aussi bien des services que des machines ; des tarifs étaient même avancés, 240 k€ pour une machine, et environ 150 € pour la réalisation d'un prototype de quelques mm^3 .

MICROTEC a abandonné l'idée de vendre ses machines mais propose toujours ses services. En France, la société MULTISTATION est chargée de distribuer cette offre de services : en 5 ans, aucune vente n'a abouti, et seulement trois contacts « avancés » ont été pris, mais ont avorté notamment du fait d'un coût trop élevé.

Le procédé initial de SL a alors été modifié pour conduire à un procédé toujours basé sur la photopolymérisation, mais par masque cette fois, qui est encore une propriété de

MICROTEC, et qui permet la réalisation de nombreuses pièces en parallèle. Ainsi, MICROTEC ouvre la "SL" à la fabrication rapide en grande série. En 1999, MICROTEC aurait réalisé un chiffre d'affaires de 1,02 M€, et comptait 9 employés ; fin 2001, la société emploierait 19 personnes. Elle ne commercialise pas de machine.

Il n'existe ainsi pas aujourd'hui de machines de microPR disponibles à l'achat sur le marché ; en conséquence, les sociétés de services ou « bureaux » en prototypage rapide ne sont pas en mesure de proposer des pièces à l'échelle « micro », excepté le bureau de prototypage rapide suisse PROFORM, qui a collaboré avec l'EPFL de Lausanne à la réalisation d'un prototype de machine de microstéréolithographie. Cette machine permet la fabrication d'objets polymères avec une résolution de 5 à 10 µm (c'est la duplication de la machine dont j'ai déjà parlé dans la partie concernant la recherche universitaire, relative à l'EPFL).

A votre connaissance, les fabricants mènent-ils eux même des travaux de recherche et si oui dans quels domaines?

Oui, 3D Systems a une force de recherche très conséquente, et surtout rachète tout ce qui fonctionne, par la force de brevets déposés et contraignants. De manière générale, la quasi-totalité des sociétés qui fournissent des systèmes de prototypage rapide par SL (microSL aussi) fonctionnent presque à partir de procédés qui leur appartiennent et qu'elles ont elles-mêmes développé ou co-développé. Les recherches concernent aussi bien les procédés que les matériaux ou les logiciels de CAO/CFAO, préparation des données, gestion de la mise en forme. Cette politique conduit à des machines/résines/logiciels quasi-standards qui imposent une grande fidélité aux fournisseurs.

A noter la position particulière de l'entreprise belge Materialise, qui est devenue leader mondial en ce qui concerne les logiciels permettant de réparer et contrôler le bon état de fichiers STL (format standard utilisé pour la SL), et qui est aussi très en pointe sur le domaine du logiciel pour les applications médicales de la SL (prothèses). Cette société bénéficie de rapports privilégiés avec 3D Systems et DSM/Somos (matériaux pour la SL), et développe ses propres machines pour le médical et les grandes pièces. Là encore, il est quasiment obligatoire de passer par ces logiciels dès lors qu'on s'intéresse à la fabrication de maquettes pour le médical (le DCPR à Nancy s'est ainsi équipé de certains de ces logiciels).

MATERIALISE (bureau français)

Zone industrielle - 41 Avenue de la Déportation

26101 Romans-sur-Isère

Tél.: 04 75 05 00 22 - Fax: 04 75 02 51 02

email: prototype@materialise.fr

site: www.materialise.com

3 SLA 250

1 SLA 350

3 machines Stéréo Next Day (450x290x200)

3 machines Stéréo Materialise (max: 2100x650x600)

1 machine Stéréo médicale Materialise

A votre connaissance, les entreprises françaises, utilisatrices de tels bancs de prototypage, sont-elles des PME utilisant le process acquis avec la machine, ou existe t-il des gros utilisateurs qui mènent de leur côté des travaux de recherche et de développement de ces procédés?

A ma connaissance, les entreprises françaises qui utilisent la SL achètent des systèmes complet de prototypage rapide pour les utiliser pour du service, ou pour leurs besoins propres si elles sont assez grosses (constructeurs automobiles typiquement). Je ne pense pas qu'elles mènent des travaux de recherche/développement à partir du procédé (à part le CTTC, mais il s'agit d'un centre de transfert).

3) Les résines photosensibles utilisées

Ces résines sont-elles spécifiques de la stéréolithographie ou ont-elles d'autres applications?

Elles sont totalement spécifiques à la SL, et même pire : elles sont souvent spécifiques à la machine de SL utilisée, y compris pour une marque donnée. La raison vient du fait que l'on doit maîtriser l'épaisseur de polymérisation, qui doit être parfaitement adaptée à l'épaisseur de couche du procédé. Et cette épaisseur de polymérisation n'est contrôlée que par l'absorption du matériau, donc les résines sont développées pour une source laser donnée (on distingue les résines pour les lasers Argon UV, pour les lasers HeCd, pour les YAG triplés). Enfin, la résine doit aussi être adaptée au système de mise en couche de la machine (viscosité).

Quelles sont les grandes familles de résines existantes pour la stéréolithographie?

Il y a deux grandes familles, qui sont les résines acrylates, et les résines époxy. Ces dernières sont en voie de développement intensif. En particulier, RPC se distingue en proposant des époxy qui tiennent en température jusqu'à 200°C environ, contre 80°C typiquement pour les acrylates. De son côté, SOMOS/DSM propose des époxy qui ont des propriétés mécaniques proches de certains plastiques de référence (PP, PE, ABS), ou encore avec des degrés de souplesse très variés (résines souples de type caoutchouc). Ces nouveaux matériaux permettent la réalisation de prototypes quasi-fonctionnels, car proches des prototypes "bonne matière" tant recherchés.

Qui sont les fournisseurs de ces résines?

Les deux principaux producteurs de résines pour la stéréolithographie sont DSM SOMOS, filiale du groupe néerlandais DSM spécialisée dans les matériaux pour prototypage rapide, et VANTICO. Cette dernière a été formée à partir de la division « Performance Polymers » de CIBA SPECIALITY CHEMICALS.

Ces deux producteurs ne sont cependant pas seuls sur le marché. La liste complète est donnée ci-dessous :

- ✉ [Asahi Denka Chemical Products](#) Manufactures photopolymers. (Japan)
- ✉ [DSM Desotech Inc.](#) (USA) Manufactures photopolymers. Acquired DuPont SOMOS line of photopolymers.
- ✉ [ISR Corporation](#) Manufactures photopolymers. (Japan)
- ✉ [RPC Rapid Prototyping Chemicals](#) RPC supplies stereolithography resins with material properties from resilient to hard and temperature resistant - for any UV laser available in SLA's. (Switzerland). Compagnie achetée par 3D Systems en octobre 2001, donc maintenant américaine.

- € [SIBCO Inc.](#) (USA) Supplies photopolymers for all SLA equipment.
- € [Spectra Group Ltd.](#) (USA) Provides contract research and development services in photochemistry, visible light photoinitiator products, cure monitoring instrumentation and technology, and is a medical model service bureau.
- € [Tuxedo Photopolymers](#) (USA) A subsidiary of [American Dye Source](#). Manufactures a range of photopolymers, photoinitiators and intermediates, as well as conductive and light emitting polymers. (Canada)
- € [Vantico](#) (USA) (Formerly Ciba Speciality Chemicals.) Manufactures photopolymers and numerous other products. The company has acquired the AlliedSignal photopolymer line and also Avecia's Stereocol line of photopolymers, including materials that produce color models. Vantico formerly sold their products exclusively through 3D Systems, but now sells directly to customers except in Japan.

Pour les utilisateurs que nous sommes à Nancy, les résines des lignes SOMOS et RPC sont (étaient, pour RPC) les meilleures (les autres nous étaient de toute façon "interdites", voir ci-dessous)

Existe t-il des fournisseurs français ou européens?

Français non, "européens" presque, puisque les deux leaders maintenant sous étiquettes américaines proviennent du contrôle de sociétés européennes. Mais un gros problème pour des chercheurs en SL spécialisés surtout sur le procédé, est qu'il y a des conventions entre 3D Systems et une bonne part des fournisseurs de résine qui nous interdit de nous en procurer si nous n'avons pas de machine SLA. Apparemment Vantico vient de se libérer de cette contrainte. On arrive à se procurer des résines SOMOS, mais je ne suis pas sûr que les résines RPC, que nous achetions régulièrement avant son rachat, soient encore disponibles.

DSM Somos®

Via della Stazione 7F
00042 Anzio (Roma), Italie
Tél.: +39 06 9865179 - Fax: +39 06 9871694
email: Europe@dsmsomos.info
site: www.dsmsomos.info

VANTICO

107/111 avenue Clemenceau
92000 Nanterre
Tél.: 01 55 51 88 60 - Fax: 01 55 51 88 61
email: lionel.breuilly@vantico.com
site: www.vantico.com/tooling

Pour les résines non françaises ou européennes, existe t-il, à votre connaissance, des limites ou restrictions légales (environnement, santé, ...) à l'importation de nouvelles résines, ce qui conduirait les utilisateurs français à être en permanence en retard par rapport aux pays producteurs, ou ayant des législations plus souples?

Je ne sais pas. Nous n'avons jamais été confrontés à ce type de problème à Nancy.

4) Activité industrielle française

Avez vous des informations sur l'activité industrielle, en France, liée à la stéréolithographie (nombre d'entreprise, effectifs, CA,...) et sur son taux de croissance?

3D Systems a une succursale en France :

3D SYSTEMS FRANCE

26, rue Jean Rostand
Parc Club Orsay Université
91893 ORSAY CEDEX

Sinon, l'ensemble de l'activité industrielle française dans le domaine de la SL repose sur des bureaux d'études qui proposent des services en prototypage rapide (fabrication de pièces à partir de fichiers informatiques). La totalité de ces bureaux proposant la SL est équipée de machines SLA de 3D Systems. Il me semble que le marché augmente assez sensiblement. WOHLERS ASSOCIATES recense 397 bureaux de prototypage rapide fin 2001 dans le monde. En France une trentaine d'acteurs propose des services en prototypage (toutes technologies confondues). Un certain nombre sont des établissements d'enseignement technique ou supérieur et des centres de transferts technologiques (CRITT, ...). On identifie cependant quelques sociétés privées, dont les caractéristiques sont présentées ci-dessous.

société (département)	CA 2001 (M€)	effectifs
ATELIERS CINI (54)	10,5	120
CEP (72)	1,9 ^(a)	< 10
CREAXIA (69)	1,0	< 10
CRESILAS (91)	3,5	20
PROTOMETAL (72)	0,4 ^(b)	< 10
VALLA (69)	1,0	< 10

(a) : CA 1998 ; (b) : CA 2000

tableau : chiffre d'affaires (CA) et effectifs de
sociétés de services en prototypage rapide, incluant la SL

Si non, connaissez vous à quel syndicat professionnel est rattaché ce secteur d'activité?

Non, mais l'AFPR (Association Française de Prototypage Rapide) est très probablement le meilleur contact à prendre pour obtenir ce genre de données. Il s'agit probablement de la meilleure ressource française en PR.

AFPR

13-17 rue Périer - 92120 Montrouge

Tél.: 01 49 65 08 09

Fax: 01 49 65 08 58

mél: info@afpr.asso.fr

web: <http://www.art-of-design.com/afpr/> (site remarquable par son contenu, en particulier son annuaire du PR)

Connaissez vous un ou deux industriels français représentatifs de cette activité?

Parmi les acteurs français du PR, il me semble que les 3 suivants sont les plus concernés par la SL :

CRESILAS

2 ZI du Fod des Près

91460 MARCOUSSIS

Tél.: 01 69 80 69 69 - Fax: 01 69 80 94 28

email: proto@cresilas.fr

site: www.cresials.fr

Machines : 8 SLA 250, 1 SLA 3500, 2 SLA 500, 1 SLA 5000, 1 OPTOFORM

CREAXIA

12 rue du 35ème Régiment d'Aviation

69500 BRON

Tél: 04 78 41 47 77

Machines : 2 machines SLA (3D Systems)

Matériaux : 1 résine époxy proche de l'ABS

1 résine époxy proche du PP-PE

LCO Protomoule - Groupe ARRK

ZI les Champs de la Pierre

74540 ALBY sur Chéran

Tél.: 04 50 68 12 39 - Fax: 04 50 68 12 79

email: lco@lco-protomoule.com

site: www.lco-protomoule.com

3 machines de stéréo. : SLA 250.50 de 3D Systems

1 machine de stéréo. : SLA 3500 de 3D Systems

J'ai quelques données concernant le marché du PR aux niveaux mondial et européen, sans pouvoir distinguer la SL parmi les autres technologies. WOHLERS ASSOCIATES évalue le parc mondial de machines de PR à 6 755 unités fin 2000 ; il serait passé à environ 8 000 unités fin 2001. Celui-ci est alimenté par des ventes d'environ un millier d'unités sur les dernières années : 1 178 en 1999, 1 320 en 2000, et un volume comparable en 2001. Le marché avait démarré sur des bases nettement inférieures à la fin des années 80 : 34 machines en 1989, et environ une centaine d'unités chaque année suivante jusqu'à 1993.

Ces machines auraient permis la fabrication de quelque 3 000 000 de pièces en 2000, soit une productivité moyenne d'environ 450 pièces / machine / an.

L'ensemble de ces activités aurait généré en 2000 un marché mondial voisin de 1 Md€, composé :

€# d'un marché primaire, correspondant à la vente de produits et de services, et représentant quelque 60 % des 1 Md€, soit 600 M€ en 2000 ;

€# d'un marché secondaire, correspondant à la vente d'outillage, de répliques... fabriqués à partir de prototypes « modèles », d'environ 400 M€ en 2000.

Le marché européen du PR peut être également estimé à partir du parc correspondant. Le nombre d'unités installées en Europe fin 2000 serait proche de 1 700, représentant environ 25 % du parc mondial. Sur cette zone géographique, 750 000 prototypes auraient ainsi été fabriqués en 2000. En faisant l'hypothèse que les prix de ventes sont identiques au niveau mondial, le marché européen aurait ainsi atteint 150 M€ en 2000 pour la vente de produits et de services de PR.

5) Formations

Existe t-il des formations spécifiques à ce secteur d'activité?

Pas à ma connaissance en temps que tel sur la SL, mais les écoles citées plus haut (Institut Supérieur des matériaux du MANS, Ecole Centrale de Nantes, CRSA – CREATE, CESTI / SupMéca Toulon) proposent des cours en PR, dans lesquels la SL est très surement présentée. Le CRIF (Belgique) propose aussi des séminaires qui peuvent être considérés comme des formations, en PR.

A noter la formation interne sur le PR destinée aux personnels du CNRS organisée en 1998 par Serge CORBEL (DCPR, Nancy), à Nancy.

Enfin, le congrès annuel de l'AFPR (voir plus haut) est le rendez-vous incontournable en France des représentants de la plupart des acteurs mondiaux du PR, qui y exposent leurs machines ou leurs réalisations. Un cycle de conférences ouvertes aux acteurs industriels comme académiques est aussi proposé.

CRIF (centre de support technologique)

Parc Scientifique de la Cense Rouge

Rue Bois Saint Jean 12

B4102 Seraing (Belgique)

Tél.: 00 32 43 61 87 00 - Fax: 00 32 43 61 87 02

email: thierry.dormal@crif.be

site: www.crif.be

Machines : SLA 250 et VIPER, Optoform

6) Recommandations éventuelles

Avez vous des recommandations à faire sur des axes qui vous paraissent stratégiques et qu'il serait intéressant de faire remonter au niveau du Ministère de la Recherche.

Je suis juge et partie en répondant à cette question, donc je pense qu'il vaudrait mieux poser cette question à des représentants de l'AFPR, par exemple.

J'ai quand même fait apparaître dans le texte un axe qui me semble être prioritaire, qui est la microfabrication 3D (application directement visée : la microfluidique, mais il doit y en avoir d'autres), dans lequel l'optique a un rôle à jouer. Cependant, je pense que cet axe fait déjà partie des axes stratégiques du Ministère (en tout cas, le Programme Interdisciplinaire de Recherche "microfluidique" du CNRS met bien en avant le besoin de développer des technologies de microfabrication 3D).

Les autres axes concernent essentiellement les matériaux, et l'optique est moins concernée. Sauf si l'on considère les interactions lumière/matière dans le cas de formulations fortement chargées en poudres, avec comme souci la volonté de contrôler la diffusion de la lumière sur les particules.

7) Compléments d'information sur certains points

L'axe de la microSL fait beaucoup appel à des masques dynamiques. Pouvez vous préciser s'il s'agit de masques projetés ou de pupilles de phase agissant sur le front d'onde, ou éventuellement des deux.

Il s'agit toujours de masques projetés, généralement binaires en intensité.

Compte tenu des résolutions recherchées, ces masques doivent comprendre un grand nombre d'éléments (pixels ou miroirs élémentaires), séparés par des intervalles dont les dimensions ne sont plus négligeables par rapport à celles du pixel. Qu'en est-il des effets dus à la diffraction de ces interstices sur la qualité finale de l'image projetée? Existe t-il, à votre connaissance, des travaux sur des composants dynamiques à haute résolution ne présentant pas de discontinuités entre pixels afin de diminuer ces effets parasites?

Les effets dus à la diffraction sont très gênants lorsque on utilise des sources cohérentes. C'est pourquoi la totalité des machines actuelles de microSL par masque fonctionne à partir de lampes à mercure, ou d'autres lampes visibles, incohérentes.

Les masques LCD que j'utilise actuellement ont effectivement un coefficient de remplissage de 64 %. Par contre, les masques à micromiroirs (DMD), les plus utilisés en microSL, ont un taux nettement supérieur, de 85%.

Par contre, je ne connais pas de travaux consistant à améliorer ces valeurs.

Au niveau du matériau, la structure en pixels n'est pas trop gênante, car les matériaux diffusent généralement suffisamment pour que les pixels se tiennent une fois la polymérisation effectuée.

L'aspect de la simulation de l'interaction lumière-matière dans le cas des matériaux fortement poudreux semble être un problème critique.

Voyez vous des propositions ou des suggestions à faire pour essayer de sensibiliser le Ministère de la Recherche à ce problème?

C'est un des aspects qui gêne beaucoup les personnes qui travaillent en milieux chargés, et cet aspect devient courant en SL (outillage rapide). Mais je n'ai rien de précis à proposer.

Y a t-il des équipes en France qui auraient les compétences pour aborder un tel problème, même si actuellement il ne fait pas partie de leurs axes de travail?

Thierry Chartier (SPCTS, Limoges) m'a confirmé son vif intérêt pour améliorer la compréhension des interactions en milieu fortement chargé. Il possède l'expérience, mais pas la modélisation (ils se basent beaucoup sur l'empirisme pour l'instant). Pour lui, les simulations de type Monte-Carlo sont trop loin de la réalité.

Est-ce un problème spécifique à la France, ou même à l'Europe, ou au contraire est-il généralisé?

Je ne sais pas. Il semble tout de même que peu de publications aient été proposées sur ce sujet, au niveau mondial, mais je n'ai jamais vraiment cherché à faire une biblio là-dessus.

J'ai aussi noté votre inquiétude en ce qui concerne la position de la recherche en France, qui est en perte de vitesse, à l'exception des matériaux céramiques. Votre inquiétude couvre t-elle aussi le secteur de la microSL (ce que je crois comprendre)?

J'étais pour l'instant le seul chercheur en France à travailler quasiment exclusivement sur la microSL. Ma mutation à Marseille fera que je vais y passer moins de temps, et surtout que mon but ne sera pas de développer la microSL, mais de reconstruire et d'utiliser une machine spécifique pour des applications en biophotonique. Par contre, il est prévu que je monte une machine DMD UV avec le SPCTS, pour que l'on unisse nos savoir-faire. Dans ce cadre, nous devrions pouvoir proposer une machine intéressante, qui sera développée si possible dans un souci de transfert industriel, avec le CTTC (Limoges).

J'espère que cette association de compétences pourra faire en sorte de continuer le développement de la technique de microSL en France.

Les matériaux fortement poudreux conduisent sans doute à des problèmes de diffusion ou de diffraction importants, liés aux dimensions des particules, ce qui réduit la résolution théorique.

L'utilisation, comme source de lumière, d'impulsions ultra brèves, de type pico et surtout femtosecondes, et la possibilité de provoquer des phénomènes à deux photons peut-elle conduire à une amélioration?

Les phénomènes à deux photons ont été utilisés pour des matériaux non chargés. Il se pose alors le problème de la vitesse de fabrication des objets, qui pour l'instant n'ont jamais dépassé le mm^3 , en raison de la taille de la zone active du faisceau pour la polymérisation.

Surtout, la focalisation impose de travailler sur des épaisseurs polymérisées de l'ordre du micron, ce qui interdit le dépôt de couches de matériau les unes sur les autres, surtout dans le cas d'une viscosité certaine. La méthode consiste plutôt à balayer le faisceau dans le volume du matériau, en 3D, avec des miroirs galvanométriques. Et donc, on est limité à des matériaux transparents, non chargés.

7.8 Optique diffractante

Bernard KRESS Olivier PARRIAUX***

** Diffractive Solutions Strasbourg*

*** Lab. TSI St-Etienne*

7.8.1 Présentation du domaine

L'optique diffractante englobe une grande variété d'éléments basés sur la diffraction d'une onde électromagnétique incidente, par opposition aux éléments réfractifs ou réfléchissants basés sur la réfraction et la réflexion de la lumière. L'optique diffractante fait partie de ce que l'on désigne comme la micro-optique ou les micro-technologies de par la taille de ces éléments (millimétriques en général) et des microstructures dont ils sont composés qui sont de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde de l'onde incidente électromagnétique que l'on veut traiter. Dans certains cas ces optiques peuvent être macroscopiques, notamment en ce qui concerne les applications à l'usinage par faisceau laser de grand diamètre, les interconnexions optiques ou les écrans plats. L'optique diffractante est parfois associée à d'autres technologies micro-optiques comme l'optique intégrée en télécommunications et les microsystèmes optiques (MOEMS).

Une manière de définir l'optique diffractante est de la comparer à l'holographie (utilisation d'un laser pour l'enregistrement d'un hologramme dans une couche photosensible). En effet, l'holographie classique peut être qualifiée d'holographie analogique du fait de sa nature photographique, et l'optique diffractante comme holographie synthétique ou holographie digitale (ou encore optique digitale): au lieu d'enregistrer les franges d'interférence de l'hologramme sur une plaque, on calcule ces franges par ordinateur et on les grave ensuite dans un substrat tel que le verre, le plastique ou le quartz par des procédés de fabrication très semblables aux procédés de microlithographie utilisés dans l'industrie microélectronique.

7.8.2 Les cinq types d'éléments diffractants

Ayant défini les éléments diffractants par rapport aux éléments optiques actuels, on conviendra de les classer en 5 différents types: les optiques diffractantes de type analytique, numérique, hybride, de type MEMS et finalement de type sub-longueur d'onde:

- chronologiquement, on trouve d'abord les optiques diffractantes de **type analytique** qui sont calculées, comme leur nom l'indique, de façon analytique. En général, ces optiques se limitent au remplacement des optiques de type réfractant (lentille de Fresnel remplaçant une lentille réfractante, réseau linéaire remplaçant un prisme, etc) ou à l'intégration de fonctionnalités optiques assez simples (focalisation ou collimation, dispersion chromatique,

etc). Ces éléments sont souvent appelés **DOE** (Diffractive Optical Elements, un nom générique du fait de leur apparition très précoce). Les technologies de fabrication des DOE peuvent être de type usinage diamant ou microlithographie. Le calcul analytique peut être basé soit sur le traditionnel lancer de rayon ou alors la théorie scalaire de la diffraction.

- ensuite, on trouve les optiques diffractantes de **type numérique** qui en général intègrent des fonctionnalités optiques plus complexes que celle des DOE, et qui de ce fait ne sont plus calculable par des procédés simplement analytiques. Ces éléments sont souvent optimisés sur ordinateur par des algorithmes itératifs du genre algorithmes génétiques, recuit simulé, recherche binaire directe ou algorithmes de type IFTA (Iterative Fourier Transform Algorithms), ou calculés par des techniques numériques (Dammann gratings ou filtres de Fourier). Du fait de leur complexité et de leur apparence (le résultat de l'optimisation itérative par ordinateur ressemble souvent à des franges d'interférence holographiques), le nom de **CGH** (Computer Generated Holograms) leur a été communément donné. Ces éléments sont presque exclusivement fabriqués par microlithographie. L'optimisation des CGHs est basée sur la théorie scalaire ou semi-scalaire de la diffraction, et non plus sur le lancer de rayons.

- les éléments de **type hybride** sont généralement des éléments de type analytiques qui sont associés dans le même matériau et par la même technologie de fabrication à des éléments optiques réfractifs, réflectifs, ou même de type guide d'onde. Il y a plusieurs avantages à hybrider ces éléments entre eux: premièrement ils peuvent être fabriqués en une seule étape bien qu'il s'agisse en fait d'une imbrication d'éléments totalement différents de par leurs type et fonctionnalité optique, et deuxièmement par la mise en commun des différents points forts de ces divers éléments. Les techniques de fabrication de ces éléments hybrides sont en général l'usinage diamant pour les éléments diffractifs hybrides de type réfractif/réflectif ou alors la microlithographie pour les éléments diffractifs hybrides de type guide d'onde. La théorie utilisées pour le calcul de ces éléments hybrides peut être de nature scalaire (hybrides/réfractifs) ou alors de type BPM - Beam Propagation Method - (hybrides/guide d'onde).

- la quatrième catégorie d'éléments diffractants est un peu spéciale car elle est presque entièrement basée sur la technologie MEMS (Micro Electro Mechanical Systems). Bien que ces éléments restent de type très simple jusqu'à ce jour (soit lentille de Fresnel ou réseau linéaire dispersif), ils ont une très intéressante particularité : ce sont des **éléments dynamiques**. Dynamique non pas dans leur fonctionnalité optique, mais dans l'efficacité de cette fonction optique (leur efficacité peut varier de zéro à presque 100%, en passant par un continuum de niveaux de gris). Ici, la théorie de calcul reste exclusivement scalaire du fait que les structures MEMs restent en général bien plus grandes que la longueur d'onde incidente.

- la dernière catégorie d'éléments diffractants concerne les **éléments sub-longueur d'onde**. Elle est très différente des quatre précédentes dans le sens où ces derniers obéissent non plus à la théorie scalaire ou semi-scalaire de la diffraction mais sur des procédures plus complexes qui recourent à la théorie vectorielle de la diffraction et à des technologies de nano-fabrication tout autant qu'à des technologies classiques de micro-lithographie car leur dimension caractéristique est de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde ou inférieure. Ces éléments peuvent être des réseaux binaires à très haute efficacité, ou alors des éléments résonnants intégrant des fonctions de filtrage plus avancées dont le principe se rapproche des cristaux photoniques.

7.8.3 Méthodes et outils de conception

Après avoir passé en revue les différentes catégories d'optique diffractantes, nous allons maintenant analyser les principaux outils de conception et de simulation sur le marché à ce jour :

-en ce qui concerne les éléments de type **DOE et hybrides** réfractifs/diffractifs (première catégorie et moitié de la troisième catégorie), il existe une large variété d'outils de CAO sur le marché qui découlent directement des outils de conception d'optiques réfractives traditionnelles. En fait, ces outils sont tous basés sur le traditionnel lancé de rayon et sont donc de par cette limitation très insuffisants en ce qui concerne la prédiction de l'efficacité de diffraction ainsi que du rapport signal à bruit. Citons par exemple CodeV de ORA à Pasadena, Zeemax de Optima, OSLO de Breault Research et Opsis de Toulon. Il est important de noter qu'aucun de ces logiciels de CAO n'est à même de produire les fichiers de fabrication de ces optiques (pour usinage diamant ou pour lithographie). Quelques logiciels sont sur le marché depuis peu pour la conception d'éléments de type CGH (deuxième catégorie). Citons LightTrans en Allemagne mais ces logiciels de conception sont limités à des cercles académiques et ne sont pas sous forme commerciale.

- en ce qui concerne les éléments de type **MEMS diffractifs**, il n'existe à ce jour aucun logiciel de conception.

- pour les éléments de type **sub-longueur d'onde** (dernière catégorie), il existe quelques logiciels d'analyse de réseaux linéaire (logiciel Grating Solver, US), mais la majorité des codes restent sous forme académique et très peu commercialisés. Mentionnons les codes pour réseaux résonnants appliqués aux capteurs biologiques et filtres de A. Tishchenko, LTSI, Saint-Etienne.

Un seul logiciel à notre connaissance englobe la conception, la simulation et l'analyse des tolérances des 3 premières catégories d'optique diffractives par l'utilisation de la théorie scalaire et semi-scalaire, ainsi que la génération des fichiers de fabrication aux standard de la micro-lithographie ou de l'usinage diamant pour toutes les catégories d'éléments diffractifs. Ce logiciel est développé et commercialisé par Diffractive Solutions, Strasbourg.

7.8.4 Compromis technologiques et coût de fabrication

Le côté budgétaire de la fabrication des optiques diffractives est à traiter avec soin. Il faut d'abord la distinction entre fabrication par usinage diamant et fabrication par micro-lithographie. Notons que la réplique par embossage ou moulage par injection peut se faire après l'application de l'un ou l'autre de ces procédés de fabrication pour le master.

L'efficacité de diffraction est le critère le plus important quand il s'agit d'estimer le prix d'une fabrication d'un élément diffractant. En effet, plus le nombre de niveaux de phase fabriqués dans l'élément est important, plus l'efficacité de diffraction sera grande en principe. Par exemple, un élément dit binaire (c'est-à-dire qui a seulement deux niveaux de phase ou de relief), aura une efficacité limitée à moins de 40%. Un élément à modulation de relief quasi-analogique (ou ayant une infinité de niveaux de phase ou de relief) aura une efficacité de diffraction théorique de 100%. L'usinage diamant est un procédé par lequel il est assez facile de produire un relief quasi-analogique, mais qui reste limité à des formes circulaire pour lentille de Fresnel on-axis (tournage diamant) ou rectilinéaires pour réseaux de diffraction linéaires (usinage linéaire). Donc pour la fabrication d'éléments plus complexes (DOE off-axis ou matrices de DOEs, CGHs et réseaux non rectilinéaires, réseaux liés à des guides d'ondes, réseaux sub-longueur d'onde), il n'est plus possible d'utiliser l'usinage diamant.

La microlithographie est une technique de fabrication issue de la microélectronique. C'est une technique binaire qui utilise des masques binaires dans le processus d'insolation de résines en photolithographie, soit par stepper, soit par contact (aligneur de masques). En une étape de lithographie, on arrive à fabriquer deux niveaux de phase. Il faut n étapes (et donc n masques

binaires et n étapes de photolithographie suivies de n étapes d'usinage ionique) pour fabriquer un élément à 2^n reliefs ou niveaux de phase. Plus le nombre d'étapes de lithographie est important, plus le nombre de niveaux de phase sera grand ainsi que l'efficacité de diffraction théorique, plus le prix de la fabrication sera élevé. Mais aussi, à chaque étape de lithographie, il y aura des erreurs systématiques de fabrication (erreurs d'alignement des masques, erreur de profondeur d'usinage ionique, etc). Plus grand sera le nombre de niveau plus le bruit et les ordres de diffraction parasites grandiront et réduiront ainsi la qualité du module optique final. Il faut noter aussi une autre limitation: plus le nombre de niveaux est élevé, plus l'ouverture de l'élément sera réduite pour une "feature size" donnée de l'outil de transfert photolithographique.

Depuis quelques années, des recherches ont été menées pour développer une technique de lithographie dite de grey-scale, qui en une seule étape de lithographie arrivera à transférer un relief quasi-analogique sur la galette finale. Cette technologie s'appuie sur l'élaboration de masques (ou réticules) à niveaux de gris (technologie HEBS de Canyon Materials à San Diego High Energy Beam Sensitive glass) ou alors Se-Ge de Aerial Imaging à San Jose (resist inorganique de type Se-Ge). Mais ces efforts restent académiques et sont encore rarement exercés dans l'industrie. Par ailleurs, ils ont tous deux des imperfections notables (le HEBS, produit une résolution passable de l'ordre de 10 microns, et l'utilisation du résist inorganique Se-Ge est assez compliquée avec un process très nocif). D'autres techniques de lithographie à niveaux de gris ont été proposées, mais pour des résolutions très médiocres (20 microns), qui sont basées sur une densité variable d'ouvertures ou de grandeur d'ouvertures dans des masques binaire de chrome (CSEM en Suisse).

Il est donc primordial pour arriver à un produit final de rapport qualité/prix intéressant (et viable commercialement), de maîtriser parfaitement la technique de fabrication (usinage diamant, lithographie binaire, lithographie grey-scale) ainsi que la technologie de fabrication (stepper ou aligneur de masques, usinage ionique ou plasma, etc), ses qualités et ses limitations. Par exemple, il est important de pouvoir juger à partir de quel nombre d'étapes de lithographie le bruit et les ordres parasites l'emporteront sur l'efficacité de diffraction de l'ordre principal.

7.8.5. Les applications industrielles

Les **DOEs** sont en général appliqués à l'exécution de fonctions de remplacement d'optiques réfractives ou réfléchives, de par leur gain en poids, en encombrement et en coût d'assemblage. Un autre avantage est qu'une lentille diffractante asphérique n'est pas plus chère à fabriquer d'une lentille diffractive sphérique, ce qui n'est loin d'être le cas en optique réfractive.

- L'usinage laser emploie beaucoup d'éléments de type DOE, usinés sur des matériaux de type ZnSe, ZnS, Ge ou en réflexion/diffraction sur des substrats de quartz ou métal recouvert d'or. Ces éléments asphériques diffractants peuvent focaliser ou collimater efficacement les faisceaux lasers de découpe de type CO₂ ou Nd:YAG (Trumpf en Allemagne, Holo-Or en Israël, Coherent aux USA),
- Dans le cas où ces éléments sont utilisés dans le spectre optique et peuvent être réalisés dans du plastique, ils peuvent être répliqués en masse par embossage ou moulage par injection, techniques éprouvées pour la réplique d'éléments traditionnels réfractifs/réfléchifs, et tout spécialement pour des applications en biotechnologies (Thales US, Affimetrix, CSEM),

- Les réseaux de diffraction classiques de type dispersifs tombent aussi dans la catégorie des DOE (calculés analytiquement sous théorie scalaire de la diffraction). Ces réseaux sont en général utilisés dans des spectromètres ou alors dans des démultiplexeurs de longueur d'onde (réseaux d'ordre supérieur pour DWDM, voir Highwave Optical, etc).
- Les combineurs holographiques basé sur des techniques d'enregistrement en volume et à haute efficacité destinés aux équipement de visualisation dit « tête haute », un marché de niche jusqu'à très récemment dévolu à l'aéronautique militaire pour lequel on voit se profiler au travers des programmes de R&D mondiaux une diversification certaine vers l'aéronautique civile (US et F) ainsi qu'une regain d'intérêt au niveau automobile (FIAT).

Un autre aspect intéressant de ces DOEs en micro-optique est que, s'ils sont fabriqués par micro-lithographie, ils peuvent être pavés sur une grande surface avec un taux de remplissage de 100%, ce qui n'est pas le cas pour des optiques traditionnelles (par exemple une matrice bidimensionnelle de lentilles de Fresnel pour des applications de type conformation de faisceau laser, focalisation sur matrice de CCD, analyseur de front d'onde en optique adaptative ou implémentation d'imagerie complexe).

Les **CGHs** sont en général utilisés pour la réalisation de fonctions optiques complexes ou impossibles à réaliser en optique classique. On citera en autres:

- les filtres de Fourier pour la détection en temps réel de formes dans une image 2D
- (plusieurs entreprises et universités, DOC USA).
- les séparateurs de faisceau (un faisceau incident et plusieurs faisceaux diffractés dans des directions bien précises de l'espace), applications en métrologie optique, en interconnexions optiques ou pour la distribution d'horloge synchrone dans un ordinateur à multi-processeur (MCM) Cray et Sun Microsystems, Thales pour les signaux RADAR aéroportés), soudage multi-points en une passe par laser CO₂ (Trumpf, Allemagne et Sumitomo Osaka),
- les générateurs de formes utilisés en métrologie optique et en divertissements (les pointeurs laser représentant des formes géométriques),
- conformateurs de faisceau laser qui peuvent transformer un faisceau laser initialement gaussien en un faisceau uniforme de section carrée par exemple, ou la transformation d'un faisceau multimode CO₂ ou Nd:YAG en une distribution d'intensité requise pour le traitement laser de surface de pièces mécaniques ou leur soudage,
- génération de formes complexes 2D et 3D (clavier virtuel de Canesta à San Jose ...)

Les **éléments hybrides** sont appliqués à des fonctions optiques bien précises. Ces applications sont nombreuses et utilisent les points fort des divers éléments ainsi hybridés. On peut citer:

- L'achromatisation de lentilles réfractives par l'adjonction d'une facette diffractante (en effet, la dispersion spectrale réfractive est de signe inverse à la dispersion spectrale diffractive). Singlet hybride achromatique au lieu doublet classique achromatique et de même pour réaliser l'athermalisation d'une lentille réfractive. Cette alternative est utilisée par Canon au Japon pour leur nouveau zoom hybride diffractif/réfractif et dans de nombreux systèmes d'imagerie infrarouge pour l'optronique (SAGEM ? et Thales Angenieux en France au même titre que leurs concurrents mondiaux tel que Coherent US).
- Un élément hybride réfractif/diffractif dont l'efficacité de diffraction n'est que de 50% permet de focaliser deux spots dans des plans différents et aussi de corriger deux aberrations différentes. Ceci est utilisé dans pratiquement tous les lecteurs DVD qui peuvent lire non seulement les CD-ROM (premier spot focalisé) mais aussi les DVD (deuxième spot

focalisé). Ainsi, il n'est plus nécessaire d'utiliser et d'échanger mécaniquement deux lentilles différentes dès que l'on change de média dans ce lecteur (Matshushita et Panasonic au Japon).

- Combinée à des guide d'onde 2D, l'optique diffractante hybride a permis aux démultiplexeurs DWDM de type AWG (Arrayed Waveguide Gratings), ou phasars, de voir le jour (combinaison de guide d'onde et de diffraction dans des volumes 2D). Toute une série de start-ups DWDM ont vu le jour à San Jose durant le boom telecom.

- Une autre application où l'optique diffractante est hybridisée à des guides d'ondes est la sélection spectrale d'une longueur d'onde parmi plusieurs grâce à un coupleur de Bragg (réseau linéaire de Bragg usiné sur la structure à guide d'onde) (General Photonics à Chinon et Digilens à Sunnyvale en Californie).

- Une troisième application de type biotechnologique où l'optique diffractante (réseau plan linéaire) est hybridisée à des guides d'onde plan 1D sont les capteurs d'affinité qui mesurent en temps réel la variation de l'indice de réfraction à la surface du guide due à une réaction biologiques y prenant place (Affinity Sensors UK, ASI, Novartis, Zeptosens en Suisse).

Les élément que l'on appelle de plus en plus les **MEMS diffractants** sont de la quatrième catégorie. Cette technologie à été développée très récemment pour proposer des solutions dynamique à plusieurs problèmes liés aux réseaux DWDM reconfigurables de nouvelle génération :

- L'utilisation d'amplificateurs EDFA non linéaires dans des réseaux DWDM reconfigurables a créé la nécessité d'égaliser le gain spectral de ces amplificateurs. L'utilisation d'un réseau de diffraction statique traditionnel pour la dispersion spectrale du signal DWDM sur la bande C (1528 à 1561nm) combinée à l'élaboration d'un réseau linéaire dynamique MEMS orthogonal au premier et très peu dispersif a résolu ce problème. En effet, le signal dispersé spectralement tombe sur le réseau MEMS qui module en temps réel l'efficacité de diffraction le long du spectre du signal et ainsi arrive à diffracter plus ou moins de signal en fonction de la longueur d'onde, en d'autres termes, à égaliser le spectre du signal amplifié (e.g. Lightconnect à Fremont et Optical MicroMachines à Sunnyvale en Californie).

- Sur la même base (utilisation d'un réseau dispersif fixe et d'un réseau orthogonal de type MEMS, d'autres entreprises commencent à proposer des applications DWDM du genre OADM reconfigurables (Optical Add Drop Modules), compensateur dynamique de dispersion chromatique, compensateur dynamique de dispersion de mode, etc.

- D'autres applications utilisant des réseaux diffractants de type MEMS sont en cours, et ne sont pas forcément reliées à des applications de type DWDM. Par exemple MEMS Optical, Polychromix Technologies, USA, proposent des réseaux programmables capables de diffracter dans une seule direction un continuum de composantes spectrales d'amplitude contrôlable, ce qui ouvre de larges perspectives à la spectroscopie de corrélation.

Concernant les éléments diffractants **sub-longueur d'onde** comme les réseaux, les marchés traditionnels comme la spectroscopie ne peuvent supporter plus d'acteurs industriels que les 4 ou 5 grands déjà en place (J & Y, Spectrogon, RGL, Zeiss). Ce sont les applications nouvelles des réseaux, ainsi que les moyens de fabrication nouveaux qui, par leur qualité, leur productivité, mais aussi par leur ouverture, leur traçabilité, vont ouvrir de nouveaux marchés que de nouveaux acteurs devraient pouvoir exploiter. Ces nouvelles applications sont les biocapteurs, les interconnexions optiques, les capteurs de déplacement/rotation de haute résolution, la spectroscopie plus diversifiée, les filtres télécom, les écrans plats, les vitrages intelligents, les hologrammes minces mais efficaces, les miroirs laser, les compresseurs/étireurs d'impulsion banalisés, les surfaces antiréfléchissantes, les polariseurs et d'autres applications qui relèvent des cristaux photoniques mais dont il est pour le moment

difficile d'anticiper le futur commercial. La technologie de fabrication usuelle de réseaux uniformes ne va pas être remplacée mais chaque fois qu'une fonctionnalité plus riche est demandée, qu'un certain degré de traçabilité est nécessaire ou qu'une 2ème source doit être assurée, les technologies nouvelles, plus ouvertes, seront préférées.

7.8.6. Les perspectives de l'optique diffractante et la situation en France

Au niveau théorique, la plupart des problèmes de fond ont été résolus et les groupes français y ont été pour beaucoup (le LSP, Université Louis Pasteur, pour ce qui est des éléments des trois premières catégories et, en matière de réseaux de diffraction, le LOE (maintenant Laboratoire Fresnel), le LASMEA de Clermont-Ferrand et l'IOTA). Au niveau des moyens de modélisation, seul le LSP a eu comme politique de mettre en valeur son travail théorique sous forme de codes commerciaux. Ceci est en contraste avec l'action de groupes étrangers comme les Universités de Joensuu, de Iéna, de Neuchâtel pour n'en pas citer d'autres comme Rochester, qui offrent des solutions diffractantes complètes y compris pour la fabrication (dans le sens de "manufacturing") et les bancs de tests.

Il reste encore des problèmes théoriques de fond dans les cristaux photoniques, particulièrement en présence de métal. Les enjeux sont grands car il s'agit de fonctions de filtrage avec retombées attendues dans les écrans plats, les vitrages intelligents. Il reste aussi un problème d'analyse numérique concernant la vitesse et la précision de calcul pour les structures 3D dans la perspective de l'introduction de solutions vectorielles dans le design de DOEs et pour résoudre le problème inverse en temps réel dans le cas des réseaux, ce qui intéresse la microélectronique.

Au niveau technologique, le problème de la fabrication des éléments diffractants et des réseaux est celui qui conditionne l'entrée de ce domaine dans la société industrielle. Or, beaucoup reste à faire.

En ce qui concerne les DOE, les CGH et les hybrides, la fabrication d'un relief de surface à profil continu ne peut pas être considérée comme un problème complètement résolu. La technologie de fabrication la plus répandue est la fabrication multi-niveaux, comme chez Colybris, Neuchâtel, où un recours complet est fait aux technologies de fabrication fiabilisées de la microélectronique. Ses limitations ne sont prévenues que par une technologie encore à inventer de "gray scale". Un relief continu peut être obtenu par pressage (embossing) d'un matériau ou d'un film plastique ou par injection, où le problème de la continuité du profil est reporté sur le moule. Cette technologie est à même de produire un grand nombre d'éléments de très bas coût. Le désavantage, dont bien des produits s'accommodent cependant, est la résistance thermique et mécanique limitée de l'élément et un vieillissement plus rapide; les matériaux sol-gels seraient un bon compromis mais la technologie de micro-structuration est encore à développer. Signalons en France, la position de pointe de Hologramme Industries en matière d'embossage de structures anti-contrefaçon et d'identification de papiers valeurs et documents.

En ce qui concerne les technologies de fabrication de réseaux, les process et équipements de la microélectronique sont maintenant à même de produire des éléments de filtrage pour longueurs d'onde télécommunications. Les aberrations des steppers et les erreurs de stitching sont acceptables. Il est remarquable que ceux-ci sont à peine capables de réaliser de tels filtres pour le visible car les dimensions caractéristiques réalisables ne sont pas inférieures à 150 nm, et encore, avec les steppers de la dernière génération. C'est dire que la technologie

traditionnelle d'exposition par interférence suivie de prise d'empreinte, jalousement gardée secrète par ceux qui la maîtrisent vit encore de beaux jours; il est remarquable que les masques de phase pour réseaux de Bragg sur fibre optique soient ainsi produits (Ibsen, Lasiris, ...) sauf chez Photonics. Une technologie alternative en train d'émerger est celle du pressage de films plastiques donnant lieu à des réseaux profonds de profil quasi-rectangulaire (Nanopto, USA); ces filtres de longueur d'onde et de polarisation sans pertes sont promis à d'importants développements pour les écrans plats, les écrans actifs (OLED) et vitrages. En matière de DOE, il faut noter le développement par Thales-Angénieux de combinaison réfractive/diffractive de lentilles réalisées par usinage diamant pour l'infra-rouge ainsi que par moulage plastique pour le visible. Le seul établissement s'étant doté de moyens de fabrication de DOE planaires est l'ENST de Bretagne. Le potentiel de fabrication des DOE en France est encore relativement faible.

Concernant les réseaux dispersifs traditionnels, Jobin & Yvon a une position de force sur le marché international tout comme Hologramme Industries. Par contre en matière de « réseaux complexes » à base de micro-structures plus fines et à profil contrôlé de type sub-longueur d'onde, plusieurs laboratoires sont à même de réaliser des structures expérimentales de l'ordre de quelques dizaines de nanomètres (LPM, LETI, LEOM) mais il n'existe pas de fonderie. Il n'y a pas encore de pont entre l'excellence du travail théorique et les applications industrielles. Dans le domaine des réseaux d'indice, citons les filtres de Bragg par inscription UV dans les verres ayant atteint un niveau de maturité industriel pour les télécommunications (avec de nombreux acteurs français Alcatel, Highwave ...), les réseaux réalisés par implantation ionique par le Laboratoire Fresnel et IBS ainsi qu'à Thales l'utilisation des photopolymères pour l'étude de composants à base de profil d'indice dont une caractéristique très importante par rapport aux réseaux gravés sera le coût de fabrication si on les associe à des procédés de fabrication de type réplique optique.

On peut distinguer dans le marché des éléments diffractants des applications de masse comme les écrans plats et les vitrages intelligents, les micro-optiques pour DVD, les biocapteurs. Un grand nombre d'applications ouvrent un marché diversifié pour lequel des PME ne peuvent agir que s'il existe des possibilités de modélisation et de fabrication sous forme de sites ouverts. Les tâches qui découlent de l'analyse faite plus haut sont regroupées au chapitre consacré aux recommandations.

7.8.7. Recommandations

On peut distinguer dans le marché des éléments diffractants des applications de masse comme les écrans plats et les vitrages intelligents, les microoptiques pour DVD, les biocapteurs. Un grand nombre d'applications ouvrent un marché diversifié pour lequel des PME ne peuvent agir que s'il existe des possibilités de modélisation et de fabrication sous forme de sites ouverts. Les tâches qui découlent de l'analyse faite plus haut nous semblent être les suivantes.

Concernant les DOE, CGH et hybrides

- favoriser l'exploitation du potentiel existant en théorie/modélisation en relation avec les industriels de manière à disposer d'outils prenant en compte les contraintes liées à la production et aux équipements,
- effort national ou européen pour élaborer une solution à la lithographie gray scale de haute résolution pour éléments efficaces et de grande ouverture,

- développer le secteur des matériaux à haute résolution pour atteindre un niveau industriel à partir des compétences en photochimie et en polymères afin d'assurer une autonomie par rapport au monopole DuPont US
- création d'un pôle national pour manufacturing de DOE/CGH en liaison avec le potentiel de la microélectronique et visant à disposer des nouveaux outils industriels de fabrication pour ces composants optiques spécifiques

Concernant les éléments (sub-)longueur d'onde

- remplir le fossé entre potentiel théorique brillant et applications industrielles,
- développer les réseaux résonnants et sub-longueur d'onde (paradoxe de la réflexion résonnante de 100% démontré brillamment par D. Maystre en 86 et qu'Hologramme Industries exploite maintenant seulement en 2003 sur la base d'un brevet étranger)
- développer un potentiel technologique de microstructuration sub-micronique ouvert avec possibilités vers les grandes surfaces,
- développer les techniques de moulage de microstructures dans des matériaux synthétiques aux meilleures propriétés thermo-mécaniques comme les sol-gels.

8.1 Composants et sous-systèmes

Jean-Michel MAISONNEUVE
ONERA - DOTA

8.1.1. En guise d'introduction

Je note que parmi les domaines pris en charge par les groupes de travail ne figurent pas les applications liées à la culture et aux loisirs telles que la photo, la vidéo, le cinéma. Cela signifie-t-il que l'on considère que ces domaines sont inaccessibles à l'industrie française et qu'il n'y a aucune niche à explorer ? La présence en France de fabricants de composants entrant dans la réalisation de systèmes pour la culture et les loisirs m'apparaît de nature à prendre en compte ce thème dans le bilan que nous réalisons. Nous pourrions émettre des recommandations pour conforter la position des acteurs de ce domaine, voire les aider à bien se placer, dans la perspective de ruptures technologiques.

8.1.1.1 Hypothèses de base

Pour conduire ma réflexion sur les « composants et systèmes », je pars des hypothèses de base suivantes :

- 1) Le développement de l'industrie française constitue la finalité de l'activité de ce domaine, comme des autres d'ailleurs, avec la création d'emplois à la clé. Toute activité sur ce thème doit donc à un moment donné intégrer les aspects recherche, technologie et marketing.
- 2) L'optique est une technologie diffusante qui a vocation à être associée à d'autres technologies telles que l'électronique et la mécanique. L'activité du thème « composants et systèmes » doit donc être menée en relation avec ces disciplines.
- 3) L'activité « Composants et systèmes » est très générale aussi on ne peut s'en tenir qu'à des considérations très générales sur l'analyse et les propositions. J'ai ajouté à la fin une partie plus détaillée correspondant à mon vécu à l'Onera.

8.1.1.2 Constats

Je fais les constats suivants qui peuvent paraître d'évidence (je m'appuie sur les résultats d'une étude réalisée en 96-97 par la société SMD, disparue depuis, avec la participation de l'Onera, sur l'optique de précision à la demande du ministère de l'industrie) :

- 1) Le développement de l'industrie optique française, jusqu'à environ 1990, a été financé en grande partie par la Défense, ce qui lui a permis de créer un savoir-faire important.
- 2) La décroissance des financements Défense à partir de cette date a placé cette industrie dans une situation difficile car absente de marchés de substitution, en particulier grand public.

- 3) La recherche a été et reste bien soutenue par les pouvoirs publics, y compris Défense, et dispose d'un potentiel de très bon niveau international.
- 4) Cependant actuellement des diminutions spectaculaires (en particulier dans le domaine des télécoms mais pas uniquement) dégradent cette situation.
- 5) Le transfert des connaissances et des résultats entre recherche et industrie ne se fait traditionnellement que difficilement.
- 6) La situation de l'Industrie et de la Recherche en optique, et de leurs relations, appelle donc des mesures afin de les préparer aux activités futures, et le thème des « composants et systèmes » occupe de ce point de vue une position stratégique.

8.1.1.3 Conséquences

De cette situation découlent les conséquences suivantes :

ü Concernant l'industrie :

- ç Actuellement cette industrie est en grande difficulté car il lui est difficile de se développer sur des marchés grand public qu'elle n'a pas vraiment cherché à investir (sauf exception comme SAGEM ou ESSILOR), alors qu'elle prospérait à l'intérieur d'un marché captif (grands programmes étatiques) en développant des niches spécialisées (de type moutons à cinq pattes) mais limitées (très petites séries).
- ç Cette industrie, bien que dotée d'un savoir-faire important est fragile car elle n'est pas prête pour de nouveaux marchés ; elle demeure très individualiste en ayant développé une très faible représentation syndicale, partagée entre le GIFO et la SFO.

ü Pour ce qui de la recherche :

- ç La recherche publique, qui a développé une préoccupation limitée pour le transfert des résultats vers l'industrie, s'est ancrée dans une culture de la recherche pour la recherche où la concurrence entre labos français constitue l'enjeu majeur des activités.
- ç L'appel à la recherche est faible de la part des industriels, à part dans des secteurs ciblés comme l'aéronautique, l'espace et la défense. Ainsi on a toujours du mal en France à faire le produit que demande le marché.

8.1.2. Quelques suggestions d'ordre général :

1) *S'attaquer à la racine du problème qui est d'ordre culturel*

Il faut repenser les habitudes des uns et des autres : que la recherche s'oriente en fonction des besoins industriels et que l'industrie fasse appel à la recherche. Un centre de recherche comme l'Onera, aujourd'hui mène des activités et prépare des projets en concertation avec l'industrie aérospatiale. Cà, c'est un bon exemple. Cependant, les PME sont quasiment exclues du cercle des partenaires. En optique (comme dans d'autres disciplines ancillaires) nous ne sommes pas incités à intégrer les PME dans nos activités alors que le potentiel dans ce domaine est important (le DOTA comprend environ 120 ingénieurs et techniciens). Bien entendu, il faut garder la possibilité pour la recherche de mener des activités non directement ou non immédiatement applicables. Dans ce cadre, le rôle des pouvoirs publics est

prépondérant comme aiguillon de la recherche et pouvoir d'incitation de la concertation industrie-recherche. Les centres de recherche se dotent de contrats d'objectif et de moyens. L'Onera prépare le sien, d'une durée de cinq ans, pour la fin de l'année. Cela pourrait être l'occasion d'inscrire clairement des objectifs de concertation avec les PME, notamment optiques, en y affectant les moyens nécessaires.

2) *Mettre en avant la concurrence mondiale pour abaisser les barrières franco-françaises*

Ce paragraphe est un corollaire du précédent. J'ai été frappé lors de mon passage à la SFO (j'y ai fait huit ans au conseil d'administration plus deux ans comme président) de l'individualisme des industriels français. La mise en commun de moyens leur est difficile. Ils s'appuient (tous ne sont pas représentés) sur deux représentants, le GIFO et la SFO, ce qui affaiblit leurs possibilités d'action commune, sans parler des nombreuses instances européennes. Il devient urgent de favoriser la concertation entre les industriels eux-mêmes afin qu'ils parviennent à vaincre les réticences pour la mise en commun de moyens au bénéfice de la profession dans son ensemble.

3) *Favoriser la synergie de la communauté optique*

Cela découle du paragraphe précédent et passe par la création d'un syndicat fort. Ceci est un besoin crucial pour faire du marketing industriel, de la veille technologique, de la diffusion des informations scientifiques, technologiques, économiques et stratégiques, du lobbying (à Bruxelles), etc., à l'image du syndicat japonais OITDA (Optoelectronic Industry and Technology Development Association) qui affiche au bénéfice de l'industrie optoélectronique de promouvoir : (i) le développement technologique, (ii) l'établissement de normes, (iii) la création d'entreprises, (iv) le renforcement des échanges internationaux. Les actions à entreprendre comprennent la réalisation chaque année d'un état des lieux des composants et des systèmes optoélectroniques. Ce que nous faisons cette année pourrait être réalisé tous les ans par la communauté optique et optoélectronique avec l'aide des pouvoirs publics.

4) *Penser la démarche au plan européen*

Un centre de recherche comme l'Onera est en relation avec l'industrie aérospatiale qui est devenue européenne (AIRBUS, ASTRIUM, EUROCOPTER, etc.). Pour l'optique nous ne sommes que vaguement incités à faire la courte échelle aux PME pour des activités européennes. Une véritable stratégie à l'échelle nationale, toujours dans le cadre des contrats d'objectifs et de moyens peut faire évoluer la situation. S'inspirer de l'exemple des centres de technologies allemands comme les Instituts Fraunhofer qui développent des relations très étroites avec les industriels et sont financés en partie par les régions. Qu'en est-il des CRITT ? Dans mon domaine, je n'ai pas beaucoup d'échos sur leur activité.

8.1.3. Réflexions sur le domaine aérospatial-défense

La situation du thème « Composants et systèmes » dans le domaine aéronautique-espace-défense appelle les réflexions personnelles suivantes :

1) Concernant les composants, le spatial a soutenu des développements de capteurs pour la télédétection et de lasers pour la métrologie. Il faut souligner le rôle moteur du Cnes dans ce contexte qui, au travers de la R&T, conduit des actions de prospective et d'évaluation de composants et de technologies d'assemblage, des études et des développements de filières stratégiques, ainsi que des expertises des produits et de leur méthode de réalisation. Cette démarche, conduite pour les composants et les systèmes, a pour but de permettre à la communauté scientifique de se préparer à répondre à la demande européenne et internationale

mais aussi de préparer de manière exploratoire les futurs besoins. Les études portent actuellement sur l'évaluation d'émetteurs optiques (laser, diodes électroluminescentes, modulateurs d'amplitude) pour communication inter et intra-satellite, horloge atomique, etc., de détecteurs de nouvelle génération (APS), de micro systèmes optiques (MOEMS), et sur l'industrialisation de photodiodes et phototransistors. Par le passé, les relations laboratoires-industrie ont permis d'aboutir à des résultats satisfaisants. Malheureusement, le volume du marché ainsi généré est très faible. Cependant, la question est de savoir si ce rôle du Cnes va perdurer. Une recommandation devrait découler de cet aspect et insister sur l'importance d'un établissement public pour la promotion des développements technologiques dans ce domaine d'application.

2) Toujours en ce qui concerne les composants, la défense a généré des études de définition et de développement de capteurs, en particulier pour l'imagerie infrarouge. Les relations laboratoires-industrie sont là aussi très bonnes (exemple CEA/SLIR – SOFRADIR) puisque les résultats des laboratoires sont directement transférés à l'industrie. Le rôle de la DGA/DRET est également à souligner comme élément dynamisant de la démarche. Mais actuellement la tendance est plutôt à utiliser les composants sur étagère, générés par les applications civiles, éventuellement à les adapter aux conditions d'utilisation militaires. Une recommandation pourrait être de souligner l'importance de l'intervention des pouvoirs publics dans ce domaine, à l'image de la DARPA aux USA.

3) Pour l'aéronautique, je n'ai pas connaissance de développements de composants particuliers, spécifiquement applicables à ce domaine. Je n'ai que l'exemple récent du besoin d'un laser fibré impulsif à haute puissance comme source d'un lidar de détection de turbulences, pour lequel a été mis en place un consortium européen. Un projet a été défini et proposé à la commission de l'UE dans le cadre du 6^{ème} PCRD. Cet exemple milite dans le sens d'une implication des PME par les centres de recherche dans les actions européennes.

4) Pour ce qui est des systèmes, l'activité à l'Onera est très orientée défense, particulièrement en optique. Quelques contre-exemples existent pour l'aéronautique et le spatial. Dans le premier cas on trouve des systèmes de mesure, soit au sol soit à bord. La première catégorie est essentiellement constituée de systèmes de mesure comme les vélocimètres et autres dispositifs métrologiques (granulométrie, strioscopie, etc.) pour les souffleries et les bancs d'essais d'aéronefs ou de propulseurs. Elle représente un faible marché. La seconde catégorie comprend des systèmes de mesure ou de visualisation, des systèmes de transmission d'information. La demande est ici a priori plus substantielle. Sont concernés, l'anémométrie et la granulométrie, les capteurs en tout genre, les dispositifs de transmission d'information. Le marché aéronautique pour des systèmes optiques n'est pas négligeable et un lobbying efficace pourrait accentuer l'application de l'optique dans ce domaine. On ne saurait trop recommander l'action conjuguée de la communauté optique, par le biais d'un syndicat professionnel évoqué plus haut, et des pouvoirs publics.

5) Dans le domaine spatial, les réalisations dans ce domaine sont bien connues, de SPOT à Hélios en passant par les instruments Végétation et POLDER. Pour le futur, la haute et la très haute résolution (par télescope monolithique ou à synthèse d'ouverture), pour tous types de satellite et d'orbite, l'observation grand champ, et la spectroscopie par transformée de Fourier pour l'analyse de l'atmosphère restent d'actualité. D'autres approches innovantes sont envisagées à terme, notamment dans le domaine de l'infrarouge ou de la spectro-imagerie. L'étude de concepts instrumentaux innovants s'accompagnent d'études de techniques et technologies associées concernant la métrologie optique (mesureurs de distance, analyseurs de surface d'onde, mesures de FTM, etc.), le développement d'un TDI à petits pixels (7 à 8 μm), la détection infrarouge (refroidie et non refroidie) et l'étude de grands télescopes légers (autour de 1m de diamètre). La seule recommandation que je ferai est de

conserver ce rôle au Cnes, même si l'évolution nous conduit vers une plus grande européanisation de ce secteur, via l'ESA, voire via un pilotage par la commission de l'UE. Le Cnes pourrait garder ce rôle de Centre Technique qu'il joue actuellement, pour l'irrigation du tissu industriel, notamment les PME.

6) Pour la finalité défense, les systèmes étudiés, réalisés et mis en œuvre par l'Onera sont destinés à l'observation et à la mesure. Les caméras IR constituent le point le plus important du premier thème. Elles sont utilisables au sol ou embarquables. Les spectromètres IR représentent un élément important avec les granulomètres. Pour cette activité qui concerne souvent des réalisations uniques mais complexes, l'Onera se retrouve sur un terrain commun avec les industriels. On n'est parfois pas loin d'une situation de concurrence avec les grands industriels comme Thalès ou Sagem. Dans tous les cas il est difficile pour les PME de prendre part au débat. La recommandation est que les pouvoirs publics favorisent la prise en compte par la recherche publique des actions qui sont de son domaine, à savoir les études à risque, et facilitent les relations recherche-industrie afin que les industriels soient non seulement sollicités pour des commandes mais aussi pour leur préparation à des ruptures technologiques au travers d'une valorisation efficace des résultats de la recherche. C'est ce point que la DARPA met en avant dans la présentation de sa mission : maintenir la supériorité technologique des militaires US et prévenir toute mauvaise surprise technologique qui pourrait menacer la sécurité des USA, **en soutenant une recherche avancée à retombées importantes qui établisse un pont entre découvertes fondamentales et utilisation militaire.**

8.1.4. En conclusion

Je crois beaucoup à la valeur de l'exemple dans l'adoption de (nouveaux) comportements. Un syndicat peut être le lieu où les gens se côtoient (symboliquement ou non), s'apprécient et s'imitent. J'insiste donc sur la recommandation d'aide à la création d'un syndicat unique qui pourra contribuer à sortir l'industrie optique de son ghetto.

Sur le plan de la formation et suite à des discussions avec JL.Meysonnette, il semble que la formation des ingénieurs opticiens soit trop axée vers la recherche, en particulier l'IOTA, et pas assez vers l'ingénierie. Cela pose des problèmes pour les débouchés car le profil des diplômés n'est ainsi pas bien adapté à la demande.

8.2 Composants et sous-systèmes

*Philippe NERIN
ex Fogale*

8.2.1.-Introduction

Ce bilan de l'optique en France s'appuie sur mon expérience de création et de management de projets de recherche en partenariat avec des laboratoires publics et des projets de transferts de technologies entreprise-université. Puisque ces projets concernent le développement de systèmes ou modules, au carrefour de diverses disciplines telles que l'optique, l'électronique, l'acquisition et le traitement du signal, il est assez naturel que mes témoignages se rapprochent des groupes de travail 6 et 7 avec un accent particulier sur la métrologie des surfaces, la mesure dimensionnelle, l'imagerie médicale et la métrologie pour l'environnement.

L'optique est aujourd'hui un domaine très vaste tant du point de vue des technologies que des applications. La présente analyse s'est volontairement limitée à des systèmes faisant appel à des sources de lumière spécifiques : source de taille limitée par la diffraction, mais de très faible cohérence temporelle, et lasers très cohérents avec possibilité de balayage en fréquence.

8.2.2.-Les Applications industrielles

L'ensemble des dispositifs et des méthodes optiques permettant la numérisation tridimensionnelle de surfaces micro, méso ou macroscopiques touche un nombre important d'applications dans différents secteurs industriels. Dans quelques cas particuliers, ces systèmes permettent des mesures géométriques dynamiques c'est-à-dire qu'une digitalisation est encore possible sur des objets en mouvement ou en régime d'oscillations entretenues. Les champs de vue et les précisions vont de quelques mm² à plusieurs m². Les principes utilisés sont très variés : interférométrie, holographie, lumière structurée, codage chromatique, analyseurs de front d'onde.

Les entreprises françaises de ce secteur sont, pour les plus connues : Imagine Optic, Stil, Fogale nanotech, Holo 3, Mensi, Sopra. Ces PME sont confrontées à la concurrence des sociétés étrangères, elles-mêmes adossées à de grands groupes industriels tels que Zygo (Etats-Unis), Polytec (Allemagne), Wyko (Etats-Unis), Phase Shift Technology (Etats-Unis), Taylor Hobson et Leica (Suisse).

En interférométrie pour les microtechniques, il est frappant de noter que la majorité des entreprises américaines se soient fédérées pour mieux contrôler le marché international. Ces alliances renforcent leur position à l'étranger, c'est le cas de la société WYKO qui, partie

intégrante du groupe Veeco, pénètre plus aisément les centrales de technologies un peu partout dans le monde - et en Europe en particulier.

Quels que soient les principes utilisés, les dispositifs optiques font appel à des technologies ou des composants spécifiques. De nouvelles sources de lumière présentant des propriétés spatiales et spectrales nouvelles font aujourd'hui l'objet de nouveaux développements. Presque toutes les techniques citées dans ce document s'intéressent à des sources de cohérence spatiale élevée mais présentant un continuum de longueurs d'ondes le plus large possible. Ces sources permettent de former des faisceaux dont la divergence est limitée par la diffraction. La faible cohérence de la source permet d'éliminer le bruit de granularité laser et, en interférométrie faible cohérence, l'amortissement très fort de l'enveloppe de l'interférogramme permet une résolution spatiale élevée ; à titre de comparaison, une diode super luminecente a une longueur de cohérence de l'ordre de 20 μm , alors que ces nouvelles sources permettent de descendre jusqu'à 1 μm .

Les développements de ces **nouvelles sources à émission continue ou quasi continue** à base de fibres photoniques, d'effets non linéaires dans des fibres optiques standards, de 'tapers' placés à l'extrémité de guides d'onde, ou de fibres optiques à cœur liquide, constituent un progrès considérable dans le développement de diverses applications optiques que se soient pour des applications industrielles, scientifique, médicales ou biologiques.

Aux Etats-Unis, le MIT a publié des résultats à partir de fibres photoniques fabriquées par Lucent technologies. En France, l'IRCOM à Limoges et l'Institut d'Optique Duffieux à Besançon ont publiés ou testés des techniques similaires et ont obtenu des résultats équivalents voire dépassant ceux publiés par les laboratoires étrangers. Notons aussi que ce type de source peut être réalisé en introduisant un modulateur acousto-optique dans la cavité d'un amplificateur laser (UJF/LSP). Quelle que soit la longueur d'onde, les diodes superluminescentes présentent des largeurs spectrales inférieures à 100 nm alors que ces nouvelles sources permettent de gagner un ordre de grandeur.

Les progrès réalisés ces vingt dernières années dans le domaine des micro et nano technologies ont permis le développement de dispositifs, de composants et de systèmes très miniaturisés comportant des micro ou nanostructures ayant une fonction mécanique, thermique ou thermomécanique. Ces micro ou nanosystèmes sont le plus souvent des micro ou nanosystèmes électromécaniques ou opto-électromécaniques communément appelés MEMS (*MicroElectroMechanical Systems*), NEMS (*NanoElectroMechanical Systems*), MOEMS (*MicroOptoElectroMechanical Systems*) et NOEMS (*NanoOptoElectroMechanical Systems*). A titre d'exemple, les microcapteurs et les microactionneurs les plus répandus sont: les microcapteurs inertiels pour l'automobile, l'aéronautique et le grand public, les microcapteurs de pression, les microcommutateurs RF ou optiques pour les télécommunications, les micropompes pour les applications médicales, chimiques et biologiques, les microcomposants optiques ajustables, les microcapteurs thermiques et fluidiques, les microcapteurs chimiques et biologiques et les micromoteurs.

De nombreux secteurs industriels sont concernés par ces nouvelles technologies. Bien qu'un grand nombre de micro et nano composants, dispositifs et systèmes aient été développés au stade du laboratoire, le problème réside dans leur fiabilité.

Les microdispositifs mécaniques sont généralement obtenus par des techniques de micro usinage de surface ou de volume par voie mécanique, chimique ou ionique (plasma ou faisceau d'ions) et par des techniques d'assemblage. Leur taille finale, généralement inférieure

au millimètre cube, se prête bien à l'observation au microscope. Le microscope photonique standard permet l'observation de motifs à la surface de l'échantillon. Pour accéder à la troisième dimension, diverses évolutions du microscope ont été proposées. Ainsi, le microscope confocal constitue une première évolution du microscope standard. Cette technique, inventée en 1884 par Paul Nipkow, a connu diverses améliorations, notamment au niveau optique et électronique. Il existe aujourd'hui des dispositifs commerciaux performants capables de réaliser des images tridimensionnelles de micro structures telles que celles rencontrées dans les micro dispositifs mécaniques. Toutefois, le procédé à détection confocale ne permet qu'une digitalisation tridimensionnelle à faible vitesse et cette technique se prête mal à la mesure à grande distance (distance de travail de l'échantillon) indispensable lorsque le microsysteme est placé dans une enceinte environnementale où l'observation est réalisée au travers d'un hublot transparent de plusieurs millimètres d'épaisseur.

Pour les raisons évoquées précédemment, le procédé de détection interférométrique est souvent préféré au procédé de détection confocale.

Parmi les innovations dans le domaine de l'interférométrie à faible cohérence, signalons le réflectomètre à fibre optique de la société Fogale-nanotech.

Parmi les systèmes de digitalisation 3D haute résolution d'objets géométriques, citons l'exemple du LIDAR-scanner FMCW développé par la société MENSI et l'Université Joseph Fourier (Laboratoire de Spectrométrie Physique) avec la participation de Fogale et du LETIH.1-Application à l'environnement

Parmi les mesures liées à la métrologie de l'environnement, l'une des plus anciennes est la détermination de la vitesse et de la direction du vent. Lorsque la mesure est réalisée à quelques mètres du sol, un mât est solidement ancré au sol et l'instrumentation est fixée à son extrémité. Lorsque la mesure doit être réalisée à plusieurs dizaines de mètres du sol, la technique précédente est difficile à mettre en œuvre. La mesure télémétrique de la vitesse et de la direction du vent au cours du temps est un exemple d'application où l'optique peut apporter une solution originale et possible. Le LIDAR est une technique basée sur le balayage d'un faisceau laser dans l'atmosphère et la mesure de l'effet Doppler de la lumière diffusée par les particules entraînées par le vent.

Le LIDAR présente divers avantages par rapport aux techniques concurrentes :

ç Le SODAR

Le SODAR est bruyant, il est donc difficile d'imaginer l'installer en continu près de zones habitées. De plus, il est gêné par le bruit ambiant ; il ne peut donc pas fonctionner près de zones où le bruit lié à l'activité humaine est trop important (dans les aéroports seul le RADAR reste un concurrent, toutefois même avec cette technologie, la mesure du vent à basse altitude n'est pas résolue – voir l'article récent : Revue de l'Electricité et de l'Electronique, n°4, Avril 2002, les senseurs en zone aéroportuaires).

ç Le RADAR

Le RADAR permet la mesure du vent à basse altitude à une émission vers 1 300 MHz mais cet équipement est très volumineux puisque environ 100 m² au sol sont nécessaires pour le déploiement des antennes d'émission-réception.

L'émission LIDAR se situant dans le proche infrarouge ne contribue pas à la pollution électromagnétique déjà très forte au voisinage de zones urbaines et aéroportuaires.

Nous citerons deux exemples où une mesure télémétrique de la vitesse et de la direction du vent présente un intérêt :

Zones aéroportuaires : mesurer la vitesse du vent aux abords des pistes d'atterrissage à 50 m ou 100 m d'altitude est un problème qui actuellement n'est pas résolu par des techniques traditionnelles.

Gisement éolien : la mesure du gisement éolien est une donnée capitale permettant d'estimer la viabilité d'un projet d'implantation d'un parc éolien. Il s'agit de mesurer en continu la vitesse du vent à 100 m d'altitude. Un équipement pouvant être hélitreuillé et autonome d'un point de vue énergétique avec télétransmission des données constitue un autre exemple d'application où l'optique apporte une solution originale à la métrologie pour l'environnement.

Les acteurs du marché sont peu nombreux surtout lorsque l'on recherche un équipement facilement transportable. En France, la société SESO a développé un prototype pour le compte de la DGA basé sur la spectroscopie directe de l'effet Doppler. Le laser « Blanc » qui était évoqué dans la première partie constitue la source idéale dans la mise en œuvre de ce principe. Aux Etats-Unis, la société Yankee Instruments annonce la mise sur la marché d'un LIDAR transportable à détection cohérente. Dans les deux équipements, le faisceau du laser est balayé selon une section conique. Selon le signe du produit scalaire $\mathbf{k} \cdot \mathbf{v}$ (où $\mathbf{k}$ et $\mathbf{v}_H$ sont des vecteurs représentant respectivement le vecteur d'onde $\mathbf{k}$ et la composante horizontale du vecteur vitesse $\mathbf{v}$), la fréquence Doppler s'additionne ou se soustrait de la « porteuse optique ». En enregistrant cet effet en fonction de l'angle de balayage, il est possible de déterminer le vecteur $\mathbf{v}_H$. Ces technologies n'ont pas connu de succès commercial au niveau 'grand public' car les systèmes existants, certes orientés sondage des couches hautes de l'atmosphère, sont très encombrants.

Les progrès de ces dernières décennies en matière de sources laser compactes, de puissance respectable (de l'ordre de quelques watts, notamment à 1,55 μm), stimulent de nouvelles réflexions et développements notamment aux Etats-Unis (voir le système proposé TLD-6200 annoncé par Yankee Environmental Systems, Inc).

8.2.3.-Application en Science des matériaux, Imagerie médicale et Biologie

Les sources de faible cohérence sont utilisées de manière systématique dans la technique OCT (*Optical Coherent Tomography*) qui trouvent de nombreuses applications. En **science des matériaux**, la technique OCT a été utilisée comme technique de contrôle non destructif de matériaux céramiques. En **imagerie du tissu biologique**, la technique OCT a permis d'atteindre des résolutions de l'ordre du micron avec possibilité de miniaturisation de la sonde pour permettre l'examen de tissus profonds ; l'utilisation de l'optique intégrée constitue une approche adaptée pour la formation d'une image à partir d'une discrétisation parallèle ou séquentielle des points de mesure. En **biologie**, l'utilisation de sources à spectre large limitées par la diffraction permettront de nouvelles recherches en biophysique telles que la micro ou nano spectroscopie intracellulaire mais aussi elles permettront de développer de nouveaux équipements pour la différenciation, le comptage ou le diagnostic de cellules biologiques pathogènes en clinique humaine.

8.2.4.Bilan et propositions :

Nous avons insisté sur les potentialités de nouvelles sources optiques trouvant de nombreuses applications dans divers domaines tels que : les micro technologies, l'environnement, le transport, la médecine et la biologie. **La France dispose d'un potentiel de développement important sur ces nouvelles sources de lumière et les systèmes associés** mais il est regrettable de constater que sur notre territoire, aucune des applications citées précédemment n'aient fait l'objet de développements plus importants (en comparaison aux développements réalisés dans d'autres pays européens et aux Etats Unis).

Financer le développement de technologies nouvelles est nécessaire mais cela n'est pas suffisant : il faut également renforcer la recherche sur les **systèmes et les applications** qui feront usages de ces technologies. A quelques exceptions françaises près, nos universités mais plus généralement nos laboratoires de recherche, 'absorbés' par leurs spécialisations, ne développent pas une compétence ' parallèle' pour la valorisation de la recherche. Il faut donc allouer davantage de moyens à la recherche technologique pour permettre le financement et l'intégration des **études « système »** liées au développement de produits sur des **marchés identifiés**.

La prise en compte du concept de produit et l'analyse de l'environnement économique avec une évaluation des risques est toujours demandée dans un dossier de financement, elle est bien souvent rédigée par le chercheur lui-même mais elle est rarement, voire jamais, validée par un professionnel de l'analyse du potentiel économique dont le rôle serait d'approfondir les mécanismes économiques et les lois des marchés. Cette rigueur dans le **management de la recherche** doit être aussi améliorée au niveau national car la valorisation de la recherche et la création de nouvelles entreprises n'est jamais complètement le fait du hasard.

8.3 Composants et sous-systèmes

Jean Luc AYRAL
Ex NetTest

8.3.1. Panorama des acteurs industriels français, et filiales françaises de groupes étrangers

Nota : cette liste **devra être plus exhaustive**,; elle est à compléter et/ou amender ; la « classification » par rubrique peut être modifiée ; il peut être intéressant pour la synthèse de faire un tableau « Type de modules/composants – Domaine – Région géographique »

ç Composants optiques, dont fibres, connecteurs, matériaux (passifs) : réfractifs, diffractifs, transmission

ATI Optiques	
Cristal Laser	Cristaux électrooptiques
Essilor	matériaux et verres lunetterie
Highwave Optical	Fibres optiques et Filtres de Bragg
Hologram Industries	Hologrammes
Idil Fibres Optiques	Composants et connecteurs
Jobin-Yvon	Réseaux de diffraction
Nachet	
OPA Opticad	Composants optiques
Optique J. Fichou	Composants optiques
Optimask	Masques pour la lithographie
Radiall	Connecteurs
RSA Le Rubis	Cristaux Rubis
Saint Gobain Cristaux et Détecteurs	Cristaux scintillateurs
SEDI Fibres Optiques	Fibres optiques et connecteurs
TDO Fibre Optique	
Thalès Angénieux / High Tech Optics	Composants optiques
Thalès Identification	Hologrammes
Xenocs	Composants optiques X-UV

ç Couches minces pour composants optiques

Sagem (activités Reosc, Sfim,...)	
Thalès Angénieux / High Tech Optics	
Schott-Guinhard (Suisse)	
Essilor	
Cilas	
Tofico	
Xenocs	Traitements et composants X-UV

ç Composants optoélectroniques, et/dont électro-optiques, acousto-optiques
[Avanex (ex-Alcatel Optronics)]

Thalès Laser Diodes	Diodes lasers de puissance, puces 1,5 µm
Soitec / Picogiga	Composants SOI, III-V
Atmel	
Teem Photonics	Amplificateurs telecoms
Highwave Optical	Amplificateurs telecoms
Opsitech	Composants telecoms sur Silicium
Cascade Technologies	Lasers à cascade quantique
AA	Produits acousto-optiques
Photline	Modules électro-optiques
Silios Technologies	
DA-LightCom	
D-Lightsys	
Sofradir	Matrices détecteurs IR
Ulis	Matrices détecteurs IR non refroidis
Temex	
Optogone	

ç Modules et sous-ensembles à base de lasers

Quantel	Laser à solide
Thales Laser	Laser à solide
Thales Laser Diodes	Diodes de puissance fibrées
Cilas	Laser et Instrumentation
Keopsys	Laser à fibre
Highwave Optical	Laser à fibre
NetTest Photonics	Lasers accordables
Amplitude-Technologies	Lasers femto
Amplitude-Systèmes	Lasers femto industriels
Laselec	Marquage de cables
IXSea-Oceano	Gyroscopes à fibre optique
Ekinops	
Aevix	
Idil Fibres Optiques	
Osyris	
Thalès Optronique	
Sagem	
SESO	
NovaLase	Femto

. Modules et sous-ensembles d'instrumentation, hors sources laser

Imagine Optic	Mesure et correction de front d'onde
Imagine Eyes	Mesure et correction de front d'onde (ophtalmo)
Phasics	Mesure et correction de front d'onde
Lauer Microscopie	Microscopie
Micro Module	Instrumentation
Mauna Kea Technologies	Biophotonique
Locan Photonics	Telecom ; WDM
Nettest Photonics	Telecom ; WDM

GenOptics	Biophotonique
Genewave	Biophotonique
Bioret	Biophotonique
Sodern	Imagerie et instrumentation spatiale
Sopra	Instrumentation ; ellipsométrie
Tietronics	Protections contre l'éblouissement
Yenista Optics	Modules telecoms
Jobin-Yvon	Instrumentation
Thalès Optronique	
Sagem	
CSO	
SESO	Instrumentation
HGH	Imagerie IR
Bertin	Instrumentation
Trixell	détecteurs radiologiques
Fastlite	Instrumentation Femto
Photscan	Instrumentation Femto

ç Composants actifs programmables, commandables (dont mems, moens) ; et affichage

Varioptic	Lentilles à focale variable
Tronics	Mems
Nemoptic	Afficheurs
Thales Avionics LCD	Afficheurs
Kylia	Modules OADM programmables
Inanov	Afficheurs
Memscap	Mems ; optique intégrée

La liste précédente des entreprises peut paraître longue en première lecture, mais elle révèle effectivement une faiblesse nette du tissu industriel, notamment dans les différents segments de l'instrumentation, si on le compare avec la situation aux Etats-Unis ou en Allemagne. Par ailleurs, il y a dans cette liste **de nombreuses start-ups** ou entreprises récentes, qui ont encore à faire leur preuve sur le marché.

Il ne faut néanmoins pas tomber dans le catastrophisme primaire : des sociétés ou groupes ont des positions de tout premier plan au niveau mondial : Thalès Optronique, Thalès Angénieux, Sagem, Essilor, Thales Laser Diodes, Quantel, IXSea-Oceano, etc ; mais ces **positions ne sont pas des garanties** pour l'avenir, et requièrent pour les préserver des capacités d'innovation importantes. Ces positions viennent parfois d'opérations de **croissance externe** menées avec succès, ou de partenariats efficaces avec des sociétés étrangères.

8.3.2. Identification des points forts et des points faibles

Je souscris complètement au « constat » préliminaire rapporté dans le compte-rendu du 27 mars 2003, à savoir :

- ç **Complémentarité** entre les techniques d'optique en espace libre et d'optique guidée/planaire = vers des modules hybrides,
- ç Multiplicité des matériaux et technologies de l'optique planaire,

- ç Importance du paramètre de **coût** dans les conceptions de produit, car c'est une des clefs du succès d'un produit sur des marchés très concurrentiels,
- ç **Présence française forte pour ce qui concerne les recherches académiques,**
- ç **Tissu industriel faible dans le panorama mondial ;** ceci est particulièrement vrai dans le domaine de l'instrumentation, où il n'y a pas de grand acteur français, et où le tissu des PME pourrait être plus fort.

Nota : je me souviens (malheureusement) que le groupe du rapport du Cadas sur l'Optique rapportaient à peu près la même chose il y a 12 ou 13 ans.

8.3.3. Quelques réflexions (générales) sur l'industrie Photonique

L'industrie photonique, qui fut il n'y a pas si longtemps dénommée « Industrie du XXI siècle », hormis le fait qu'elle a pris un grand coup sur la tête en 2001 avec l'effondrement du marché télécom qui devait lui assurer un avenir radieux, **n'a pas la maturité** de l'industrie électronique et des semiconducteurs. **L 'aura-t-elle d'ailleurs un jour ?**

Cette maturité passerait par la mise en œuvre d'un matériau unique (ou presque unique) comme substrat et de techniques de fabrication homogènes largement partagées, comme cela est le cas dans l'industrie du Silicium.

Il risque de passer encore beaucoup de temps avant que ne s'opère une telle « synthèse » dans le domaine de l'optique, du fait notamment de la multiplicité des longueurs d'ondes demandées et mises en œuvre, et de la richesse des fonctions souvent requises dans un module : émission ; traitement = amplification, modulation, déflexion, aiguillage, etc ; et détection. Je pense qu'il faut « se faire une raison » de la conception et la fabrication de modules **hybrides**, sauf dans quelques secteurs particuliers où une approche monolithique est possible. Cela a malheureusement un impact important sur le coût du composant ou du module pour une fonction complexe donnée. En contrepartie, on dispose de propriétés et effets physiques très riches et divers, issus de matériaux ou technologies différentes et associés de manière complémentaire.

Les **micro- et nano- technologies** mises sur le marché ou en cours d'étude et de développement constituent une voie essentielle pour résoudre certains problèmes comme celui du **degré d'intégration et du coût** par module. Mais je pense qu'à chaque problème de développement de produit donné, il faut se poser, d'un point de vue industriel, la question de la **structure du coût du produit**. Cela peut certainement orienter le choix de la bonne solution. En effet, le coût du produit est relié de manière directe au coût des matières qui le composent, et du nombre d'heures pour le fabriquer, et également de l'amortissement des investissements industriels réalisés (machines et outillages) et éventuellement des efforts de R&D. Le coût des outillages à mettre en œuvre pour réaliser un module est une composante essentielle à prendre en compte dans l'analyse complète. Un exemple intéressant, mais pas unique (je pense aussi aux sources accordables pour les télécoms, sources pour transmetteurs et sources de tests), est celui des composants de type multiplexeurs/démultiplexeurs pour les réseaux télécoms. Plusieurs technologies sont (encore) en concurrence, dont celle utilisant des composants diffractifs en espace libre, et celle mettant en œuvre des réseaux de guide d'onde en optique intégrée. Ces 2 approches doivent être comparées à travers la grille des paramètres suivants :

- ç performances détaillées, dont celles de tenue en environnement (thermique, mécanique),
- ç degré d'intégration, qui a une incidence directe sur le volume et le coût
- ç coût global de production, dont les outillages associés.

Le résultat de la comparaison peut dépendre bien sûr du nombre de modules réalisés sur une période donnée, et de la pérennité des outillages, et de leur possible **mutualisation** sur d'autres lignes de produits au sein d'une même entité, ou via des plate-formes dédiées.

Dans ce domaine de l'industrie Photonique, on dispose donc souvent de plusieurs techniques (souvent chères) pour résoudre une fonction industrielle donnée et requise par le marché. Le marché, qui est souvent constitué de niches, est animé par des sociétés vraiment spécialistes. C'est d'ailleurs pourquoi à mon avis il y avait une telle attente dans la croissance des télécoms, car elle permettait à cette industrie d'accéder à des marchés de masse, avec les flux d'investissements industriels associés et la dynamique induite. Mais le « jeu » n'est pas terminé après les restructurations et reconfigurations qui sont en cours.

Quelques autres marchés de masse existent dans la l'industrie Photonique : l'affichage/visualisation grand public (où les industriels asiatiques ont pris une avance industrielle incontestable), et la correction visuelle (où Essilor est le leader mondial)

8.3.3. Comment faire en sorte pour réduire le décalage entre une Recherche de bon niveau et un tissu industriel globalement assez faible ?

Quelques pistes (pas forcément très originales, mais auxquelles je crois vraiment si des actions concrètes sont mises en œuvre) :

ç **Susciter une culture et un état d'esprit plus entrepreneur en France.** Cela passe certainement par de la formation dans les écoles et les universités, en sensibilisant plus à ce qu'est un produit, et aux mécanismes économiques d'une entreprise.

Cela passe certainement aussi par le fait de minimiser le risque et la marque d'un échec toujours possible.

ç **Renforcer encore le lien entre le monde académique et le monde industriel**, au delà des initiatives d'incubateurs, de pépinières....Un « modèle » souvent cité est celui des instituts Fraunhofer, qui en Allemagne permettent de passer du stade de l'idée / maquette au stade de prototypes/pré-séries. Le cap du développement/industrialisation est souvent un des plus critiques dans le cycle de vie d'un produit.

Il faut créer une confiance toujours plus grande, une osmose entre les chercheurs et les industriels. Je pense aussi qu'il faut que les jeunes entreprises soient conseillées efficacement dans leur vie opérationnelle, pour s'enraciner dans les premières années difficiles de leur existence.

ç **Renforcer le lien entre l'entreprise** qui conçoit le composant / module, **et l'intégrateur ou utilisateur final.** Une bonne instrumentation est le plus souvent celle qui a été développée à l'écoute et avec les conseils de celui qui l'utilisera. Cela est particulièrement critique dans les domaines liés aux sciences du vivant : médical, biologie.

ç **Coupler étroitement les analyses** « bottom-up » (ou « technology-driven ») avec les approches « Top-down » (ou « market-driven »). Cette double approche, associée avec une synchronisation adéquate de la mise sur le marché, contribue à renforcer les chances de succès. Mais ce n'est pas toujours facile a priori !

8.3.5. Analyse des difficultés rencontrées dans chacun des secteurs

ç **Télécoms** : les industriels sont encore dans la problématique de résister à la chute drastique des besoins, et donc des commandes de composants et d'instruments ; et donc de prendre des mesures drastiques pour survivre et en même temps préserver le cœur des savoir-faire pour être présent au redémarrage : pas facile, mais vital.

ç **Biophotonique** : est-ce une mode après le boom et la chute des télécoms ? Des besoins et des idées sont là, mais sans doute une industrie qui se cherche encore dans un contexte de soutiens et d'investissements dans la filière largement inférieurs en Europe/France qu'aux Etats-Unis et au Japon.

Il y a nécessité d'un couplage extrêmement fort entre les industriels des composants et des modules d'instrumentation avec les industriels/grands laboratoires de la pharmacie et des biotechnologies. Dans ce cadre les génopoles ont rôle important à jouer.

ç **Lasers et instrumentation laser** : marché mature, très concurrentiel, dure bataille sur les marges ; mais il existe de vraies opportunités de croissance sur des niches. De plus, les opportunités d'innovation existent également. Cela requiert une stratégie industrielle forte de la part des entreprises, et de la persévérance pour rentabiliser les investissements : marché du médical, dermatologie et ophtalmologie notamment. Les besoins de mesures ou de procédés à base de lasers sont innombrables. La difficulté est de les structurer pour en faire une industrie rentable.

8.3.6. Analyse des évolutions probables de l'optoélectronique après la crise des télécoms

Et pourquoi pas un avenir dans les télécoms, dans une perspective à 2 ou 3 ans ?

Parmi les équipementiers, Alcatel est toujours là. Parmi les opérateurs, France Télécom et les autres européens finiront bien par reprendre leurs investissements après une résorption suffisante de leur dette.

Pour ce qui concerne les composants, Avanex a repris le leader français Alcatel Optronics, mais il y a certainement de la place pour des PME sur des niches ; il faut choisir les bons créneaux, le besoin de réseaux à toujours plus hauts débits est toujours là.

Les besoins de composants « intelligents », **programmables et commandables** sont clairement exprimés, par exemple les fonctions d'« **add-and-drop** » de longueurs d'onde.

Un autre axe pour les développements de futurs produits : utiliser les composants qui ont été développés pour les réseaux télécoms, et qui ont atteint une maturité incomparable par rapport à la situation d'il y a quelques années, pour les autres secteurs exprimant des besoins de mesure.

En effet, ces dernières années ont vu des **percées technologiques et techniques**, qui sont pour beaucoup d'entre elles maîtrisées en France :

ç miniaturisation, fiabilisation et augmentation des performances des (micro) composants : μlentilles asphériques, isolateurs, circulateurs, obturateurs, etc

ç .matrices de μcomposants passifs : μlentilles,

ç augmentation importante de la puissance des sources lasers à semiconducteur, (et avec des qualités spectrales importantes (DFB)), des sources lasers à fibre, des amplificateurs à fibre ou guide dopé.

ç Mems, lignes / matrices de μmiroirs

ç Maturité des diodes lasers de puissance

ç Technologies de packaging, de collage, de soudure/brasage

8.3.7. Analyse des nouveaux secteurs d'opportunités

Biophotonique : voir à ce sujet le rapport qui sera présenté à l'occasion d'OPTO

ç Nouvelles microscopies

- ç Techniques d'imagerie
- ç Bio-capteurs et bio-puces

Sur les 2 premiers thèmes, il y a beaucoup de travaux menés dans les laboratoires académiques. Quelques sociétés françaises se sont lancées dans ce créneau : Mauna Kea Technologies par exemple.

Instrumentation (hors BIO) : liée aux besoins de mesure pour l'investigation des micro-, nano-technologies : nouvelles microscopies, etc

Les grosses entreprises du secteur ne sont pas en France : Agilent, sociétés japonaises et allemandes,....

Mais cela n'est pas une raison pour ne pas développer une bonne idée ou technologie qui répond à de vrais besoins du marché.

D'une manière générale, mise en œuvre des techniques d'interférométrie pour la mesure des paramètres de phase, en plus des paramètres d'amplitude ; c'est un besoin qui était clairement exprimé dans le domaine de la caractérisation des composants télécoms, avant la chute du marché.

Sécurité / Identification

- . locale : identification des individus : holographie, reconnaissance de formes
- . de site : imageries (IR)

Environnement

- . détection de polluants : spectroscopies par lasers, imageries

Autres ?

8.3.8. Réflexions sur les solutions à mettre en œuvre pour jouer dans la cour des grands

Cf réflexions au paragraphe 3 et 4

Dans le domaine de l'instrumentation, les composants et modules photoniques sont le plus souvent mis en œuvre dans des produits qui sont une vraie synthèse de compétences et de techniques qui dépassent le cadre de la réalisation du module seul : **intégrations mécaniques et interfaces logicielles et/ou de visualisation** qui ajoutent au module de base une fonctionnalité et une **ergonomie** indissociables du module lui-même.

Les sociétés qui maîtrisent cette couche de conception du produit complet apportent une valeur ajoutée supplémentaire au module photonique.

8.4 Composants et systèmes

Véronique DENTAN
Ex NetTest

8.4.1. Relations entre la recherche et l'industrie

Il existe des barrières entre la recherche publique et l'industrie qui restent encore difficiles à franchir. L'industriel est souvent perçu comme un rapace, qui veut tout obtenir sans rien donner. Inversement, beaucoup d'industriels ne savent pas, ou mal, utiliser les ressources de la recherche publique. Si les choses ne cessent de s'améliorer depuis 10 ans, j'ai l'impression que ces barrières psychologiques continuent souvent d'empoisonner le développement de partenariats fructueux et efficaces. La conséquence est de ralentir les deux parties et finalement la position scientifique et technique de la France.

Il y a une prise de conscience progressive, les instances de tutelle de la recherche publique ou semi-publique incitent de plus en plus les laboratoires à collaborer avec l'industrie. Mais au niveau individuel, je ne sais pas si aujourd'hui la carrière d'un chercheur est autant valorisée lorsque celui-ci a mis en place des partenariats industriels, et travaillé pour l'industrie, que lorsqu'il a publié N articles dans des revues internationales. Il faudrait que les deux réussites soient prises en compte avec autant de valeur.

Au-delà, on peut mettre en place différents dispositifs d'aide et de soutien. Je pense qu'il en existe déjà lorsque le chercheur a son propre projet de création d'entreprise. Pourquoi ne pas l'élargir, et permettre à un chercheur, non créateur d'entreprise, d'être détaché pendant une durée donnée dans une entreprise ou une "start-up". Là, il y aurait une véritable passerelle : elle passe directement par les personnes. Et pourquoi le limiter à la France?

La recherche en optique en France va bien, elle est dynamique, et bien positionnée au niveau mondial dans un certain nombre de domaines. Il y a un vivier de compétences, mais trop de cloisonnement.

Il faut aussi veiller à ce que, lorsque des mesures sont prises, elles soient bien visibles des industriels.

8.4.2. Forces et faiblesses de l'optique en France

Pousser les développements et les collaborations européens, à tous les niveaux et en accompagnement fort de ce qui est fait par l'Europe. Par exemple, sur l'exploitation des résultats d'un projet européen, sur la notion de brevet "européen" (c'est en cours, parlons-en et défendons-le, il y a bien eu à un moment des pubs sur l'INPI à France Inter), ...

Et aussi au niveau mondial, en particulier dans le domaine des composants et des sous-systèmes, vers l'Asie.

Quelques domaines qui me semblent porteurs dans l'avenir, liste non exhaustive et essentiellement dans le domaine de l'optique en espace libre :

L'optique réfractive et diffractive. Parvenir à focaliser ou à diffracter, la lumière en s'affranchissant d'optiques complexes, qu'il faut usiner et assembler de manière très précise...

Il existe en France une excellence dans le domaine théorique, et ailleurs des industriels intéressés. Il manque sans doute des labos qui disposent des technologies (holographie ou gravures) permettant de réaliser, valider, améliorer les structures calculées, et définir à terme des process de fabrication rentables.

L'optique avec du plastique : on a bien réussi à faire de l'électronique avec du sable... Après les cristaux liquides, on commence à voir des écrans à base de molécules ou polymères électroluminescents (OLEDs) dans des applications industrielles, les recherches sur l'effet photovoltaïque dans les polymères progressent, idem pour la fibre plastique, les modulateurs électrooptiques polymères... Il y a dans la matière organique une richesse énorme d'effets, et une souplesse de synthèse qui permet de rêver à une multi-fonctionnalité sur un volume extrêmement réduit, et à des coûts compétitifs. Au-delà des applications spécifiques que j'ai citées, qui ne verront peut-être pas toutes le jour, en tout cas pas avec la France en tête de ligne, encourager et développer des travaux et recherches entre les experts des matériaux (chimistes) et les "composantiers" opticiens aiderait à avancer plus vite dans ce domaine.

8.5

Le témoignage d'une Start-up : Photline technologies

Henri PORTE

Photline

Une particularité du développement technologique en optoélectronique mis en place ces vingt dernières années en France est qu'il s'est réalisé d'une manière plutôt harmonieuse entre les grands organismes et entreprises (CNRS, CNET, LETI, THOMSON, ALCATEL) privilégiant la diversité des technologies mises en œuvre dans les laboratoires spécialisés en évitant l'écueil de démarches concurrentes stériles, et donc des investissements redondants. Ainsi si l'on considère le domaine particulier de l'optique intégrée, la technologie sur verre s'est développée à Grenoble, notamment à l'ENSERG-INPG, la technologie sur silicium au LETI également à Grenoble, les technologies GaAs au LAAS-CNRS à Toulouse, l'InP chez Alcatel, mais également au CNET (Bagneux), où l'on a trouvé également les technologies sur polymères. Les technologies sur niobate de lithium ont été développées au CNET de Bagneux, à Besançon au LOPMD et à l'université de Nice.

Ainsi, d'un certain point de vue, c'est cette distribution des cartes technologiques qui a donné lieu ces dernières années à l'émergence d'une série d'essaimage d'entreprises sur ces technologies, telles que Teem Photonics (Composants passifs sur verre et amplificateurs intégrés) et Opsitech (filtres WDM sur silicium) à Grenoble, Highwave (Réseaux de Bragg et amplis optiques) à Lannion, Photline à Besançon et Moduloptic à Sophia Antipolis (modulateur niobate de lithium et dispositifs intégrés d'optique non linéaire) ceci aux côtés de groupes déjà existants de taille plus importante comme Alcatel Optronics (lasers semiconducteurs et amplificateurs à fibre) à Nozay.

L'effondrement du marché des télécoms qui a remis en cause les modèles économiques précédents pour lesquels les valorisations d'entreprises s'effectuaient de manière vertigineuse, nécessitent de s'orienter vers de nouveaux marchés et ceci de manière très réactive.

Pour ce qui est de Photline Technologies par exemple, c'est vers le marché des capteurs que s'est dirigé la société. Ces applications qui ont donné lieu à une véritable industrialisation dans ce domaine assurent la majeure partie des revenus de l'entreprise. Le secteur de la défense ouvre également des opportunités qui sont en croissance. Des besoins nouveaux s'expriment dans le domaine de lasers de puissance en proche infrarouge. Les transmissions analogiques par fibre optique telles que la CATV, jusqu'à présent en marge dans le domaine de télécoms par rapport aux transmissions numériques, semblent évoluer récemment de manière positive et ferme. Enfin pour une société de relativement petite taille comme Photline, le marché scientifique offre d'excellentes opportunités, à condition d'avoir une offre concurrentielle en terme de prix, et s'adaptant rapidement à la demande avec des produits très customisés.

En télécoms, Photline continue de parier sur le retour de ce marché, sur lequel une activité persiste, mais qui nécessite pour le pénétrer d'apporter une offre en rupture, non plus en terme de performances ultimes (40 ou 160 Gb/s), mais orientée vers les vrais besoins des utilisateurs avec des produits très bas coûts, performants, qualifiés et possédant de très faibles encombrements, notamment grâce à une connectique simplifiée. En répondant à ces différents critères, il devient possible d'échantillonner chez les sous-systémiers, d'entreprises qui se trouvent maintenant à l'échelon intermédiaire entre l'équipementier et le fabricant de composants. Les fabricants de sous systèmes élaborent de nouvelles cartes optoélectroniques assemblant une pluralité de composants (lasers, modulateurs, détecteurs, amplificateurs...) pour obtenir de nouvelles fonctions optiques associant en général de l'intelligence: transpondeur, amplificateur ou filtre en ligne actif...

La vague et la mode de création d'entreprises ont suscité, et on ne peut que s'en réjouir, un fort engouement dans de nombreux laboratoires publics et privés et on a assisté à de nombreux essaimages pilotés par des créateurs et dirigeants issus de la recherche. Cette démarche est hautement souhaitable pour que la Recherche dont l'essence est d'abord la Connaissance, ne reste pas stérile sur le plan économique, mais que les investissements en hommes et en moyens réalisés toutes ces années par la collectivité soient également profitables à son économie, en terme de création d'emploi et d'activités. La contre partie de ce mouvement a été la disparition rapide d'équipes qualifiées dans de nombreux laboratoires et de fait l'arrêt de certaines activités qui faisaient l'objet de travaux de recherche fondamentale poursuivis jusque là depuis plusieurs années. Ceci a pour conséquence de vider partiellement les laboratoires d'équipes performantes et hautement qualifiées sans que les personnels impliqués dans les aspects de création n'y soient remplacés aussi vite par des forces neuves. S'y ajoute le problème que les entreprises ainsi créées sont par essence fragile. La disparition de certaines d'entre elles peut ainsi se traduire par l'extinction complète et définitive de travaux et de technologies qui avaient connu un succès et contribué à la notoriété des laboratoires impliqués. Le risque est encore plus grand lorsqu'une entreprise est rachetée par une société étrangère ce qui se traduit par une fuite de savoir-faire et des brevets.

Le mouvement de création d'entreprises par des chercheurs est quelque chose de sain et de souhaitable et il est heureux que ce phénomène s'étende en fin à la France. Il présente le risque évoqué plus haut et qu'on ne pourra éviter que si de véritables structures mixtes de recherche et développement, mi-publics mi-privés, de type GIE, à mi chemin entre les laboratoires de recherche publiques et les sociétés industrielles se mettent en place dans notre pays pour réaliser de manière pérenne ces transferts de technologies. Les modèles qu'on peut retenir pour ça sont ceux des instituts Fraunhofer en Allemagne ou du CSEM en Suisse à Neuchâtel. Les entreprises privées doivent avoir dans ce sens une action plus forte pour financer de telles structures. Il est par ailleurs fondamental pour assurer la survie des 'start-up' technologiques que celles ci identifient leur complémentarité, resserrent leur lien et mettent en place de nécessaires rapprochements et partenariats.

9.1 Contrôles et mesures par techniques interférométriques et holographiques

Gérald BRUN (), Paul SMIGIELSKI (**)*
() TSI, St-Etienne, (**) Rhenaphotonics*

9.1.1 Etat de l'art

Les techniques holographiques ont depuis longtemps fait preuve de leurs remarquables aptitudes dans le domaine du contrôle industriel et sont susceptibles d'assurer, avec une très haute précision, des mesures sans contact dans les domaines de l'instrumentation optique, de la mécanique, des études vibrationnelles, du secteur automobile, de l'aéronautique et bien d'autres encore....

L'holographie interférométrique associe les performances de l'holographie à la possibilité d'effectuer en temps réel des mesures de déformations ou de vibrations en comparant le front d'onde d'un faisceau lumineux après réflexion sur un échantillon à tester avec le front d'onde de ce même faisceau enregistré préalablement sur un hologramme, dans une configuration de référence.

De nombreux laboratoires français ont réalisé des études sur le sujet : le laboratoire Charles Fabry de l'I.O.T.A., le Laboratoire d'Optique P.M. Duffieux de l'Université de Besançon, l'Onéra, l'InstitutFranco-Allemand de Saint-Louis.... Les applications industrielles se sont également développées essentiellement dans de grandes structures telles que : Michelin, PSA, EADS (Aérospatiale), SNECMA (SEP), CEA....

Les freins au développement de cette technique prometteuse dans le domaine du contrôle non destructif, résident d'une part dans l'utilisation de sources lasers parfois délicates à mettre en œuvre dans un environnement industriel et d'autre part dans la procédure d'exploitation des résultats qui nécessitent une phase d'enregistrement de l'hologramme et une phase de restitution. Jusqu'à une époque récente les seuls supports présentant les caractéristiques adaptées à ce type d'applications étaient les plaques holographiques. Chaque mesure nécessitait alors l'enregistrement d'un hologramme puis une phase de développement du support holographique, induisant des coûts importants tant au niveau des consommables qu'au niveau des temps de traitement.

Cependant, comme de nombreuses techniques optiques, l'holographie est en train de connaître un renouveau en raison des considérables avancées technologiques réalisées dans le domaine des sources et des récepteurs. C'est surtout envers ces derniers que la dernière décennie a fourni de spectaculaire progrès en raison notamment de la révolution numérique et de l'acquisition des données sur des caméras CCD. L'association des qualités intrinsèques de l'holographie et des moyens actuels d'enregistrement, couplée à l'augmentation significative

de la puissance des outils de calculs et de traitement a ouvert la voie à l'holographie numérique. Selon cette technique, l'hologramme est enregistré sous forme numérique, et est décodé par la voie d'un traitement mathématique qui permet de s'affranchir des fastidieuses étapes de développement et de restitution d'un hologramme conventionnel. Cette dernière technique évite donc l'écueil des multiples manipulations nécessaires dans le cadre de l'holographie conventionnelle et n'induit aucun coût de consommables. Notons cependant que la principale limite au développement de l'holographie numérique réside dans la résolution des matrices CCD dont les pixels ont des tailles bien supérieures à celles des émulsions photographiques classiques.

Cependant les progrès qui continuent de jalonner le développement des détecteurs CCD en terme de tailles des matrices (nombres de pixels par ligne et par colonne), en terme de taille des pixels (aujourd'hui classiquement de l'ordre de la dizaine de microns mais dont certains produits plus haut de gamme exhibent des tailles microniques) et enfin en terme de coût laissent augurer un développement prometteur de cette technique dans les à venir.

9.1.2 La formation

Si l'optique revêt aujourd'hui, dans le cadre des formations universitaires, un caractère de nouvelle technologie avec des enseignements relatifs aux lasers, aux télécommunications optiques, au traitement optique de l'information... les aptitudes métrologiques de l'optique restent encore sporadiques ou réduites à quelques exemples académiques. Rares sont en effet les formations d'ingénieurs ou universitaires qui inscrivent à leur programme des enseignements un peu exhaustifs sur le contrôle par voie optique. Citons à titre d'exemple le DEA « Capteurs Optiques et Instrumentation » des Universités d'Angers et du Mans, le MASTER « Optique Image Vision » Spécialité « Instrumentation Optique et Hyperfréquence » de l'Université de Saint-Etienne.... *Le caractère transversal et fortement diffusant de l'optique devrait néanmoins suggérer de la rendre plus présente y compris dans les filières de formation relatives par exemple à la mécanique en raison du rôle important des techniques optiques dans le cadre du contrôle non destructif et sans contact.*

9.1.3 Laboratoires du domaine

Laboratoire d'Acoustique - UMR CNRS 6613 - Université du Maine - <http://laum.univ-lemans.fr/>

Laboratoire Traitement du Signal et Instrumentation – UMR CNRS 5516 - Université de Saint-Etienne – <http://univ-st-etienne.fr/lsti>

Institut Franco Allemand de Recherches de Saint-Louis - <http://www.isl.tm.fr>

Laboratoire Charles Fabry – UMR CNRS 8501 – Institut d'Optique Théorique et Appliquée - <http://www.institutoptique.fr>

Laboratoire d'Optique P.M. Duffieux – UMR CNRS 6603 – Université de Franche Comté - <http://imfc.univ-fcomte.fr/lopmd/>

9.2 Interférométrie speckle dans le domaine spectral du visible

Pierre Jacquot,
EPFL, Lausanne
pierre.jacquot@epfl.ch

9.2.1 Le domaine¹

L'interférométrie speckle est née en 1970, peu de temps après et en tant qu'alternative à l'interférométrie holographique, dans le dessein d'éliminer les supports d'enregistrement à haute résolution spatiale ($>1000 \text{ mm}^{-1}$) et les développements chimiques qui leur sont le plus souvent associés. Le vocabulaire n'est pas fixé, ni en français, ni en anglais, et une surabondance de dénominations et d'acronymes recouvre un ensemble de techniques qui présentent pourtant une évidente unité d'inspiration: l'interférométrie speckle consiste à créer et à exploiter, spatialement et temporellement, une figure d'interférences à deux ondes, enregistrée par un dispositif photoélectrique basse résolution spatiale ($\sim 100 \text{ mm}^{-1}$); l'une au moins des deux ondes est une onde *speckle*, c.-à-d. une onde produite en réflexion ou en transmission par une surface diffusante éclairée en lumière cohérente; le support d'enregistrement est typiquement, mais non exclusivement, une matrice CCD ou CMOS.

La différence essentielle avec l'interférométrie classique se situe dans le caractère aléatoire de ces figures d'interférences, qui empêche de faire une mesure directe et absolue. En interférométrie speckle, la grandeur mesurée, ou visualisée sous forme de modulation d'intensité lumineuse, est toujours relative à l'évolution entre deux états: cette grandeur est le *changement* de phase de la figure d'interférence, proportionnel à la *variation* de la différence de marche optique entre les deux ondes. Comme son homologue holographique, l'interférométrie speckle représente une réelle percée scientifique: elle étend à tous les objets "rugueux" les techniques réservées auparavant aux seuls objets optiquement polis; elle constitue une généralisation substantielle de l'interférométrie classique. La sensibilité reste fondamentalement liée à la longueur d'onde du rayonnement utilisé, un changement de phase de 2ϕ , soit une frange d'interférence, correspondant à une variation de différence de marche égale à la longueur d'onde, c.-à-d. $0.5 \text{ }\mu\text{m}$ au centre du visible.

De ce fait, les applications sont légion, en particulier en mécanique des solides et des fluides et en science des matériaux, et concernent principalement l'analyse des déformations et des contraintes, la modélisation des structures, l'identification mécanique, le contrôle non destructif et l'inspection, la mesure de forme, l'étude et la détermination des propriétés des matériaux, ... D'autres types d'applications, en mesure de rugosité, en astronomie – l'interférométrie speckle stellaire – ou dans des régions spectrales non considérées ici – l'interférométrie SAR en micro-ondes, par exemple – témoignent de la diversité des débouchés.

Le milieu des années 80 est une période clé du développement de l'interférométrie speckle. Les procédures numériques et les algorithmes de calcul de la phase des figures d'interférences sont mis au point et trouvent immédiatement un puissant relais technologique pour leur

¹ M. Françon, *Granularité laser – Speckle, Applications en Optique*, Masson, 1978.

diffusion: les systèmes combinant caméra CCD, carte d'acquisition numérique et microprocesseur, parfaitement adaptés aux caractéristiques de résolution spatiale de l'interférométrie speckle, se répandent très rapidement. Dans le même temps s'amorce le déclin de l'interférométrie holographique, suite à l'abandon progressif par le marché des supports haute résolution spatiale les plus répandus jusque là, de type argentique ou photothermoplastique. A l'heure actuelle, en tant que méthode interférométrique et sur le plan utilisation, l'interférométrie speckle est sans réelle concurrence.

9.2.2 Aspects scientifiques et académiques

Les ondes speckle issues d'un objet diffusant sont des distributions aléatoires d'amplitude et de phase. Le problème scientifique se cristallise sur la description du phénomène de speckle et sur son rôle dans la formation des images et des figures d'interférences. Cette tâche est en grande partie accomplie et la codification scientifique de l'interférométrie speckle est très avancée. Elle n'est cependant certainement pas achevée. Elle a été le fait, à l'échelle mondiale, de 6 à 7 groupes de moins d'une dizaine de personnes chacun, à l'existence éphémère dans bien des cas, plusieurs d'entre eux ayant de nos jours bifurqué vers d'autres voies. Les physiciens, électroniciens, mécaniciens ont contribué davantage que les opticiens aux progrès de la discipline. Parmi les thèmes de recherche encore très ouverts, on peut citer, sans souci de hiérarchie ni d'exhaustivité: les régimes en faible cohérence temporelle, les méthodes et l'algorithmique de traitement d'image, l'optimisation des systèmes 3D-3D (trois composantes du champ de déplacement d'objets tridimensionnels), la quête de meilleures réponses aux besoins réels des mécaniciens, une couverture moins lacunaire des phénomènes dynamiques, ... A lui seul, le thème très en vogue de l'étude des singularités – points d'intensité nulle et de phase indéterminée – offre de belles perspectives de développement. En France, le nombre de thèses en cours visant l'approfondissement théorique de l'interférométrie speckle est vraisemblablement voisin de zéro; il se situe sans doute au delà d'une trentaine dans le monde. Dans l'hexagone comme dans la plupart des pays, l'industrie ne participe plus à ce type de recherche depuis au moins 5 ans. La seule exception notable est constituée par les projets européens, qui ont vu ces dernières années une dizaine d'industriels initier ou s'associer à 4 ou 5 projets d'envergure.

Dans l'ensemble, il est à noter que les milieux français de la recherche sont restés en dehors des développements de l'interférométrie speckle. Les fortes équipes qui avaient réalisé un travail remarquable de pionnier en interférométrie holographique, acquis à ce titre une excellente réputation internationale et qui étaient remarquablement placées pour jouer un rôle de premier plan en speckle, n'ont pas saisi cette opportunité. Convaincues de la qualité supérieure des interférogrammes holographiques et sûres de l'avenir des supports haute résolution, elles ont peut-être considéré, à tort, l'interférométrie speckle comme un avatar insignifiant de l'holographie. Les autres groupes se sont tournés à l'unisson vers les techniques a priori plus simples et plus immédiatement exploitables de photographie digitale en lumière blanche et de corrélation d'image. Par bonheur, la barre a été redressée avec l'entrée en lice récente d'équipes performantes à l'Institut National des Sciences Appliquées de Rouen, l'Ecole Nationale Supérieure d'Ingénieurs du Mans, l'Ecole des Mines d'Alès et l'Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers de Châlons-en-Champagne.

On dénombre en moyenne deux conférences internationales par an, chacune réunissant une centaine de participants et comportant une quinzaine de présentations d'interférométrie speckle, nombre que l'on retrouve aussi approximativement dans le décompte des articles publiés par les revues à comité de lecture. Le nombre d'experts en activité dans le monde ne dépasse pas la centaine.

Ces chiffres et ces données “explosent” quelque peu si l’on inclut les applications. Plus de $\frac{3}{4}$ du total des contributions présentent en effet de nouveaux champs d’utilisation ou le perfectionnement des anciens. L’industrie retrouve alors une place assez comparable à celle de l’université ou des centres publics de recherche. Les colloques CMOI², qui attirent régulièrement plus de 150 scientifiques, pour moitié secteur public et moitié secteur privé, et qui réservent toujours une place importante à l’interférométrie speckle, reflètent un niveau d’activité fort encourageant et l’intérêt porté aux applications pratiques.

L’interférométrie speckle n’est pas inscrite au programme des formations d’ingénieur ou de maîtrise des universités. Actuellement, la grande majorité des professionnels de la branche se sont formés eux-mêmes dans l’exercice de fonctions de recherche et de développement. L’enseignement de la matière se pratique à petite échelle, au stade postgrade ou formation continue. En moyenne annuelle, cet enseignement intéresse 10 à 20 ingénieurs et chercheurs, qui se voient offrir des stages d’une journée à une semaine, avec ou sans travaux pratiques. L’enseignement supérieur et les centres de transfert de technologies se chargent de cette mission.

L’interférométrie speckle est une discipline étroite, hautement spécialisée, exigeante, qui a déjà accumulé au fil de son développement une quantité appréciable de connaissances et de savoir-faire. Elle est cependant loin d’avoir épuisé toutes ses ressources. Dans le contexte actuel de stagnation des budgets alloués à la recherche, son potentiel de développement scientifique est largement mis en jachère.

9.2.3 Aspects industriels et économiques³

La mesure est la finalité de l’interférométrie speckle. Se profilent donc derrière cette technique trois secteurs: la production de systèmes, la vente et la prestation de services. Les donneurs d’ordre appartiennent aux industries aéronautique et aérospatiale, automobile, de production d’énergie et au génie civil. L’industrie a acheté ses premiers systèmes speckle au début des années 90. Le contrôle non destructif et l’inspection se taillent la part du lion, comparés aux domaines plus scientifiques de l’analyse de déformation et du comportement mécanique. Ceci explique que les systèmes de type interférométrie différentielle (shearography) sont les plus vendus. Le marché n’est pas en état de boom, mais connaît une croissance régulière de 6 à 10% depuis plusieurs années. C’est un marché mondial étroit, de l’ordre de 10 MEURO par an – soit quelques % du marché total de l’inspection ! – qui emploie 50 à 60 personnes: il se vend de 80 à 100 systèmes, d’un coût avoisinant 100 kEUR quand ils sont complets, incluant les logiciels de traitement, voire plus chers quand la source est un laser pulsé de forte énergie ou à haute cadence de répétition. Ce marché est trop petit pour que les concepteurs développent leurs propres sources et caméras. Le métier consiste donc surtout à identifier, rendre compatibles et assembler les meilleurs composants OEM et à développer des architectures de têtes et du logiciel. La valeur ajoutée est élevée et justifiée, mais pas exceptionnelle. L’industrie absorbe environ 60% de la production, le complément allant à celles des universités qui préfèrent ne pas développer elles-mêmes leur instrumentation. La prestation de service est à peu près intégralement aux mains des constructeurs, accompagnée d’un rôle de conseil plutôt marginal de la part des universitaires.

Sur le plan de la répartition géographique, il est très instructif de faire une comparaison entre la France et l’Allemagne. Cette dernière ne compte pas moins de 5 PME axées majoritairement sur l’interférométrie speckle, dont 3 ont une représentation en France, où l’on

² Méthodes et Techniques Optiques pour l’Industrie, Colloques CMOI/SFO, Biarritz 2000, Trégastel 2001, Saint Aubin de Médoc 2002, Belfort 2003.

³ <http://optics.org/buyers>

ne recense aucune start-up! La France s'équipe par ailleurs au même rythme que les pays d'Europe les plus industrialisés.

Au sein de l'optique, l'interférométrie speckle est en concurrence avec les techniques en lumière incohérente de photogrammétrie et surtout de corrélation d'image. On estime entre $\frac{1}{3}$ et $\frac{1}{4}$ la proportion de vente des systèmes speckle par rapport aux systèmes de photographie digitale. Dans le domaine important de l'étude des vibrations, où, comme en holographie, l'interférométrie speckle apporte pourtant les avantages inégalés des méthodes plein-champ, la vibrométrie ponctuelle exerce toujours une sévère concurrence et reste choisie près de 8 fois sur 10. Quant à l'approche par simulation numérique, qui visait jusqu'au début des années 90 à s'imposer comme l'unique outil de conception et qui a freiné le développement de nombre de techniques expérimentales, il est heureux de constater qu'elle tend maintenant, au contraire, à s'entourer de plus en plus de protocoles expérimentaux et à s'engager avec ceux-ci dans une spirale de progrès. L'interférométrie speckle est très bien adaptée au test des résultats obtenus par les méthodes d'éléments finis.

L'état d'esprit des clients face à l'interférométrie speckle est l'un des éléments clé du futur de cette technique en milieu industriel. L'utilisateur actuel n'est pas intéressé par le contenu de la boîte; il veut un système presse-bouton, facile à employer, robuste, exactement adapté à son besoin de mesure et si possible bon marché. Les systèmes d'interférométrie speckle disponibles sur le marché répondent de mieux en mieux à ces exigences, sans donner encore complète satisfaction, mais disposent d'une marge de développement largement suffisante pour y parvenir.

Face à ce bilan mi-figue mi-raisin, on peut s'interroger sur l'intérêt à stimuler le marché de l'interférométrie speckle. Où se situe le réel bénéfice de la technique? Il appartient certainement à l'utilisateur, sous forme de forts gains de productivité et de retours sur investissement très appréciables. Les exemples commencent à abonder, en particulier dans l'industrie automobile, où des problèmes qui n'avaient pas trouvé de solutions durant 2 mois d'efforts par des moyens classiques sont résolus en 2 heures d'investigation par interférométrie speckle! Malheureusement, ce genre de vérité n'a que peu pénétré le monde industriel et encore moins celui de la finance.

9.2.4 Souhaits, perspectives et recommandations

Il est regrettable qu'une dose minimale de recherche de base, de type disruptif et sans contrainte de rentabilité immédiate, ne soit pas consentie à l'heure actuelle en interférométrie speckle par le secteur public.

A l'instar de ce qui devrait être entrepris pour l'ensemble des méthodes optiques, un effort de dissémination de l'interférométrie speckle devrait être accompli auprès des scientifiques et des décideurs de l'industrie. Cet effort doit être conduit dans un cadre général de promotion coordonnée de tous les moyens optiques de mesure. Il y aurait avantage à inverser la tendance selon laquelle le client ne veut pas savoir ce qu'il y a sous le boîtier: un usage plus sûr et plus pertinent de ces techniques en résulterait. Par ailleurs, d'un point de vue pédagogique et didactique, en ce qui concerne la formation des étudiants en général, l'interférométrie speckle est une discipline très formatrice qui se prête idéalement à des enseignements théorique et pratique de tous niveaux.

La richesse et la densité spatiale de l'information obtenue par interférométrie speckle est unanimement reconnue, chacun réalisant que les 10^6 pixels de la matrice photosensible se comportent comme autant de capteurs ponctuels adressés en parallèle. Les méthodes permettant de tirer pleinement profit de cette information sont encore largement à développer.

On ne peut exclure un retour en grâce des supports haute résolution spatiale sous forme, par exemple, de matériaux photoréactifs, qui induirait un regain d'intérêt pour l'inter-férométrie

holographique et son rééquilibrage par rapport à l'interférométrie speckle. Il est peu probable que la photographie digitale fasse de grands progrès en résolution spatiale, la dimension des pixels étant déjà proche des limites théoriques. Des géométries d'éclairage et d'observation inédites, répondant aux besoins spécifiques formulés par les mécaniciens, pourraient voir le jour en interférométrie speckle.

Une question très ouverte est d'estimer l'impact que les biosciences, en plein essor, pourraient avoir en interférométrie speckle, par exemple sur des versions de type microscopie.

La perspective d'un marché en croissance de 6 à 10% par an risque d'inhiber le développement de la technique. Pourtant, il existe une énorme réserve d'applications potentielles fournie par les secteurs de la conception de produits, du contrôle non destructif et de l'inspection, dans lesquels l'interférométrie speckle peut gagner des parts importantes à peu de frais et pour le plus grand profit des utilisateurs.

Remerciements

L'auteur est reconnaissant à MM. P. Smigielski, A. Ettemeyer, J.-J. Tassin, K. Galanulis et J.-M. Fournier de l'aide qu'ils lui ont apportée dans la rédaction de ce rapport.

9.3 Vision de deuxième génération

Yves Surrel
CNAM, BNM-INM Paris

On propose d'utiliser ce terme pour désigner toutes les techniques de mesure et contrôle industriels utilisant une caméra, mais où la mesure quantitative locale se fait à l'aide d'un traitement du signal avancé (corrélation ou détection locale de phase) et non pas par les outils de la morphologie mathématique (« traitement d'images » classique utilisé dans les applications de vision industrielle). On peut citer dans ces techniques :

- mesure de forme et de déplacements 3D par stéréocorrélation ;
- mesure de forme par projection de lumière structurée ;
- techniques de CND par granularité laser, en particulier « shearographie » ;
- contrôle de planéité (des marbres jusqu'aux wafers...) et contrôle d'aspect de surface par déflectométrie
- sans parler de toutes les déclinaisons possibles de l'interférométrie, que ce soit dans le domaine macroscopique (contrôles de wafers et de lentilles,...) que microscopique (mesure de rugosité...).

On peut souligner à ce stade que ces techniques de deuxième génération sont la plupart du temps beaucoup plus robustes à la lumière ambiante ou à l'uniformité d'éclairement que les techniques classiques de vision industrielle, car l'information à acquérir est *codée* dans l'image (texture aléatoire ou porteuse périodique) au lieu d'être dans le niveau absolu de l'intensité mesurée.

Importance industrielle : forme et aspect de surface

Les industries manufacturières ont considérablement évolué au cours de 20 dernières années suite à la généralisation de la *démarche qualité*, impliquant des procédures de mesure et contrôle de plus en plus fiables et sophistiquées. Par ailleurs, une certaine banalisation des performances techniques des produits (exemple typique : l'automobile) a insensiblement amené le consommateur à prêter attention à d'autres facteurs, liés aux « sensations » qu'il éprouve face à un produit (aspect, toucher, odeur, bruit). Le besoin en mesure et contrôle est donc plus important que jamais, et ces mesures et contrôles doivent être de plus en plus fiables, pertinents et sophistiqués.

Un besoin récent : la caractérisation de l'aspect de surface

Un exemple très illustratif est celui du contrôle d'aspect : un des soucis actuels de tous les constructeurs automobiles est lié au fait que la mise en peinture des caisses en blanc révèle de manière spectaculaire tous les petits défauts de forme induits par les différentes étapes de fabrication. Aujourd'hui, des batteries d'opérateurs corrigent manuellement ces défauts (détection visuelle, action corrective manuelle) en fin de chaîne sur véhicules finis. L'optique est évidemment l'outil de choix pour résoudre le problème du contrôle de l'aspect visuel.

Un besoin permanent : la mesure de forme

Il n'est probablement pas nécessaire d'insister sur l'omniprésence et l'importance de la mesure dimensionnelle (et donc évidemment tridimensionnelle) pour toutes les industries manufacturières. Il existe aujourd'hui des techniques optiques susceptibles d'avoir un apport énorme dans ce domaine. La mesure optique de forme 3D (on parle des mesures de champ par caméra : stéréocorrélation ou projection de franges) possède par rapport à la machine à mesurer tridimensionnelle les avantages décisifs suivants, dont chacun justifierait à lui seul la supériorité d'une solution optique :

- technologie sans contact
- vitesse largement supérieure (quelques secondes au lieu de dizaines de minutes ou d'heures)
- quantité d'information très largement supérieure (millions de points de mesure au lieu de centaines)

Verrou technologique : la métrologie

Cependant il s'avère que la pénétration réelle des techniques optiques de mesure et contrôle n'est pas aussi importante qu'elle pourrait l'être au vu de ses avantages. En dehors du fait que les utilisateurs sont soit réticents devant l'optique par manque de formation et de familiarisation, soit échaudés par des problèmes rencontrés lors de la mise en œuvre de systèmes de vision industrielle classique (qualité de l'éclairage, typiquement), un obstacle incontournable est souvent l'absence de traçabilité requise par les normes qualité.

Le groupe MTPO (Mesures Tri-Dimensionnelles Par Procédés Optiques), issu du Collège Français de Métrologie, et qui regroupe de nombreux industriels (CERN, LEICA, CMA, DCN INDRET, LNE, DYNAOPT, MENSI, METRA, EDF CNEPE, METRIDE, METROLEC, PSA, ESIC SN, G2METRIC, GEODESIE, GMS, HYP-ARC, SCHOLTES, IMQ, RENAULT, JEUMONT, SETAT, SYMETRIE...) travaille sur ce problème depuis une dizaine d'années, sur le mode d'un quasi bénévolat des participants, ce qui est insuffisant pour une tâche de cette ampleur. À noter que ce groupe étudie non seulement les méthodes de mesures 3D optiques par caméra, mais également les techniques optiques basées sur des mesures ponctuelles et de la triangulation.

Le congrès annuel du club CMOI (contrôle et mesures optiques pour l'industrie) consacre depuis deux ans une session à la métrologie.

Une faiblesse française : peu de fabricants

Les fabricants d'appareils de mesure et de contrôle dans les domaines évoqués sont pratiquement inexistantes en France. On trouve principalement des distributeurs de matériels allemands, américains et anglais. Une conséquence est que dans ce domaine aussi, la recherche française qui est d'un niveau très convenable ne débouche rarement sur des systèmes industrialisés.

Une cause possible : l'éloignement des communautés opticiennes et mécaniciennes

Les deux communautés scientifiques des opticiens et des mécaniciens sont traditionnellement fort éloignées en France. L'enseignement de l'optique est inexistant dans les écoles d'ingénieur de mécanique (ENSAM, par exemple...) et les opticiens n'ont que des notions succinctes de mécanique. En réalité, la mécanique est indispensable à l'optique (lors de la réalisation d'appareils, entre autres), et l'optique peut être fort utile à la mécanique.

Il faut cependant noter une série de mouvements récents montrant que le fossé commence peut-être à se combler. On peut citer à ce propos le succès qui se confirme du club CMOI de la SFO, bien reconnu par les deux communautés, la création en 2003 d'un GDR CNRS (Mesures de champs et identification en mécanique des solides), des actions de formation destinées à diffuser le savoir (cours IPSI en septembre 2003, atelier thématique CNRS en juillet 2004), etc.

Suggestions

Continuer à favoriser le transfert de technologie et à encourager l'innovation dans les entreprises, en particulier par l'augmentation des bourses CIFRE et d'autres types de financements permettant aux chercheurs de s'impliquer dans l'activité de transfert industriel. Mettre en place un mécanisme permettant aux chercheurs de valoriser au niveau de leur carrière une activité de transfert de technologie.

Encourager l'enseignement de l'optique dans les Écoles d'ingénieur, en particulier celles relevant du domaine de la mécanique.

Encourager et soutenir les actions susceptibles de maîtriser les aspects métrologiques des systèmes de mesure tridimensionnels. La France peut encore faire des avancées dans ce domaine et prendre un avantage concurrentiel par l'initiation de normes. Cet avantage ne serait évidemment intéressant que pour des sociétés développant l'instrumentation correspondante.

9.4 Capteurs à Fibre Optique (CFO)

Marc Turpin
CEDIA Innovations

9.4.1 La perception des utilisateurs potentiels

Les applications capteurs des fibres optiques ont été pressenties et très fortement étudiées dès les années 70 en parallèle des travaux de base puis du rapide développement industriel des fibres optiques. Qu'en est-il en 2003 ?

Il est clair que les fibres optiques et les technologies optoélectroniques connexes (composants passifs et actifs) ont été principalement développées pour les télécommunications. Les progrès fulgurants constatés ces dix dernières années ont été suffisamment médiatisés (en dehors de la littérature scientifique spécialisée) pour associer dans les esprits les termes *fibre optique* et *communication*.

A l'inverse, bien que des développements importants sont également constatés dans le domaine de la mesure par CFO, l'impact de cette technologie sur la masse des utilisateurs potentiels (tous domaines confondus) reste relativement faible.

Force est de constater que les possibilités offertes par les CFO pour le contrôle et la mesure sont globalement méconnues et/ou considérées avec prudence : La grande majorité des interlocuteurs industriels confrontés à des problématiques de mesure, n'associe pas les termes *fibre optique* et *mesure*. Corollairement, toute éventuelle décision d'utiliser une technologie CFO passe par une demande préalable d'information et d'explication, tant des mécanismes transducteurs proposés que des propriétés de base propres aux fibres optiques et à l'optique guidée.

3 Les utilisateurs potentiels, qu'ils appartiennent au monde des PME-PMI ou aux départements R&D ou opérationnels des Grands Groupes, ont généralement une méconnaissance quasi totale des CFO en termes techniques et économiques.

La prudence, voire la réticence à utiliser les CFO, provient assez souvent d'expériences passées (remontant généralement aux décennies 80 et 90) n'ayant pas été probantes. L'évolution des technologies, la maturité des composants (câbles, connecteurs,...) et la robustesse de l'instrumentation sont les points techniques à faire valoir.

3 Les nombreux essais peu probants réalisés avant que les technologies aient obtenues le degré de maturité requis pour une utilisation industrielle constituent un frein au développement des CFO en milieu opérationnel.

Enfin, on se heurte à un problème général de culture. L'instrumentation banalisée, essentiellement « électrique », sous-entend une compatibilité de fait entre les différents maillons d'une chaîne d'instrumentation : On sait manipuler, installer, réparer...pour la fibre optique : on ne sait pas (!)

3 L'utilisation de CFO constitue, d'une certaine manière, une rupture dans la culture et dans le savoir faire.

9.4.2 Les développements technologiques

Les développements technologiques pour le contrôle et la mesure sont directement liés à l'évolution et à la disponibilité à coût compétitif des composants et sous-systèmes optoélectroniques. Si la réelle maturité, la robustesse et la disponibilité de ces composants (fibres, câbles, connecteurs, coupleurs, sources et détecteurs,...) est aujourd'hui admise par les utilisateurs, il n'en est pas de même pour les unités centrales de démodulation du signal optique, qui restent perçues comme des produits intermédiaires entre l'appareil de laboratoire et le produit industriel.

Pour tenter de sérier les développements des CFO, une approche générique consiste à séparer les capteurs extrinsèques nécessitant l'ajout d'un élément transducteur externe et capteurs intrinsèques, pour lesquels la fibre optique agit directement comme élément sensible.

CFO intrinsèques

A ce jour, quelques produits très élaborés ont atteint un haut degré d'intégration et proposent des solutions « mesure » à haute valeur ajoutée, tirant pleinement parti des avantages premiers de l'optique guidée et dédiés à des niches applicatives très spécifiques. Sans prétendre à un quelconque classement, il convient principalement de citer:

3 Les gyromètres et systèmes associés tels que les centrales inertiellles intégrées à effet Sagnac, les capteurs de courant (et de tension) à effet Faraday et, les capteurs de température distribués à effet Raman.

A ces « produits phares », obtenus après des années de R&D soutenus, il convient d'ajouter une nouvelle génération de capteurs utilisant l'ensemble des propriétés intrinsèques des réseaux de Bragg photo-inscrits sur fibre. La très rapide banalisation de ce composant passif (développements télécoms) permet d'élargir le champs d'application des CFO en proposant une technologie de mesure hautement intégrée, parfaitement adaptée au multiplexage, et relativement versatile en termes d'application et d'installation.

3 Les réseaux de Bragg fibrés, connaissent aujourd'hui un développement important pour les mesures réparties de déformations et de température avec une haute capacité de multiplexage en longueurs d'ondes. Les domaines applicatifs sont nombreux : Instrumentation des structures en matériaux composites, bétons, bois... mesures largement déportés en milieu hostile, mesures multiples en contrôle industriel ou en laboratoires d'essais...

CFO extrinsèques

Sous cette dénomination on trouve des produits divers utilisant la fibre optique comme élément de transmission de l'information. Les éléments transducteurs peuvent être de nature très différentes, micro cavités Pérot-Fabry, éléments physico-chimiques réactifs, transducteurs mécaniques...ou simples déports de faisceaux collimatés. La diversité des mesurandes est à l'image de la diversité des techniques : déformations, température, Ph, espèces chimiques, position, distance, simple détection tout ou peu,...

Les applications sont potentiellement très nombreuses dans les laboratoires et dans l'industrie, à condition que les CFO présentent une réelle valeur ajoutée comprise par les utilisateurs : mesures déportées, CEM, flexibilité, dimensions réduites,...

La demande en technologie CFO

Outre les marchés spécifiques (marchés de niches) dans les domaines de l'industrie comme de la défense, la demande en technologie CFO est encore très diffuse et les besoins, même s'ils existent, ne sont pas naturellement exprimés.

Dans le secteur de la défense, les demandes restent à la frange du développement de laboratoire et du produit. Ou bien le cahier des charges techniques et les contraintes opérationnelles conduisent à des développements spécifiques, justifiant ainsi des actions soutenues et un coût en conséquence, ou bien à l'inverse, la demande vise à la mise en place de systèmes prédéveloppés pour la réalisation d'essais probatoires en environnement opérationnel.

Dans le secteur civil (laboratoires d'essais, industries diverses, environnement, transports...), la demande est essentiellement pragmatique et on note un intérêt croissant. La disponibilité de systèmes « clés en main » est essentielle. La valeur ajoutée technico-économique doit être démontrée.

3 Le véritable marché, en volume, se situe certainement dans le domaine civil. La croissance du marché passe par le développement de systèmes d'adressage et de lecture des capteurs à coûts attractifs.

3 Les principaux atouts des CFO qui favorise la demande sont le déport, le multiplexage, la CEM, et le caractère peu intrusif des transducteurs.

3 Les principales limitations à la demande sont la globale méconnaissance de la technologie CFO, la perception et l'expression du besoin et le coût (au moins apparent).

Les domaines pour lesquels les technologies CFO présentent une réelle valeur ajoutée : voir tableau en annexe.

9.4.3 L'offre technologique, la position française

L'offre technologique globale ou générique reste relativement limitée. Les principaux Offreurs sont recentrés sur des marchés spécifiques comme l'inertiel (France, Etats unis), l'instrumentation off-shore (Etats Unis, Norvège), l'énergie (Etats Unis, Allemagne). Dans les domaines du Génie Civil et de l'instrumentation des structures en général, l'offre pour applications industrielles tend à se diversifier, les principaux acteurs sont le Canada, les Etats Unis, la Norvège, l'Angleterre, l'Allemagne et ...la France.

En termes d'offre technologique, la France souffre très certainement d'un manque de coopération active entre le monde académique et l'industrie, à savoir favoriser les développements technologiques orientés produits. Les études et développements entrepris dans les Grands Groupes ou Organismes de Recherches débouchent trop peu souvent sur des solutions compétitives en termes technico-économiques.

Si la participation de l'Université et des Grands Laboratoires de Recherches reste essentielle au développement des nouvelles technologies, leur implication en lieu et place d'intégrateurs dans des études applicatives ne répond pas à l'attente réelle des industriels. Par comparaison avec nos voisins Anglais ou Allemand, pour ne citer qu'eux, le transfert de savoir faire entre le monde académique et des entreprises visant au développement et la commercialisation des acquis reste très faible.

9.4.4 Promotion des FO

3 La promotion des technologies CFO en France doit se faire par la mise en place d'actions de sensibilisation :

Enseignement, séminaires, conférences sur les techniques de mesures optiques pour l'industrie dans les écoles d'ingénieurs
 Formation continue ciblée
 Elargissement de la communication (Edition d'une Lettre périodique sur les techniques de mesure optique, CFO et autres)
 Recentrage des rôles de l'université et des entreprises dans l'approche client.
 Favoriser les aides aux développements des PME-PMI.

LES CFO / DOMAINES D'UTILISATION

	Avantages technologiques	Limitations au développement / Commentaires
Génie civil	Réseaux de capteurs, dépôts importants, mise en œuvre, multiplexage, systèmes peu invasifs par rapport aux technologies usuelles.. Mesures : déformations en base courte ou longue, contraintes, suivi d'intégrité structurale. Capteurs : Bragg, Pérot-Fabry, montages Interférométriques	Quelques expériences non probantes ayant marqué les esprits (en particulier par l'introduction de capteurs/détecteurs à micro-courbures). Méconnaissance des évolutions technologiques et du coût ramené au point de mesure.
Industrie pétrolière	Réseaux de capteurs, dépôts importants, multiplexage, CEM. Mesures multiparamètres : pression, température, débit, déformations, vibrations... Capteurs : Principalement Bragg	Peu de limitations techniques et pratiquement pas de limitation économique. Marché bien cerné par les Etats-Unis et la Norvège.
Prévention des risques	Réseaux de capteurs, dépôts importants, multiplexage. Mesures : températures, déformations, espèces chimiques. Capteurs : Raman, Bragg ...extrinsèques	Intérêt croissant. Quelques réalisations récentes en instrumentation (contrôle incendie dans les tunnels). Besoin de systèmes largement déployables et intégrables dans des systèmes de télésurveillance.
Contrôle de procédé, essais	Réseaux de capteurs, multiplexage, faibles dimensions transversales, CEM, isolation galvanique. Mesures : température, pression, contraintes, vibrations,... Capteurs : Bragg, Pérot-Fabry, Fresnel	Méconnaissance du réel potentiel des technologies CFO. Besoin en systèmes fortement multiplexés pour abaisser suffisamment le coût du point de mesure. Intérêt des CFO démontré par rapport au jauges de déformation classiques.
Structures aéronautique	Intégration des capteurs dans les structures composites, réseau et multiplexage. Mesures : déformations et température. Capteurs : principalement Bragg	Intégration des capteurs démontrée. Besoin en connectique spécifique. Beaucoup d'études (en particulier prgm européens !), peu de développements en Europe. Manque de démodulateurs optoélectroniques intégrés de faible volume
Transport ferroviaire,	Réseaux de capteurs, dépôts, CEM. Mesures et contrôle des	Domaine à rapprocher de celui de la prévention des risques et de la

	infrastructures, matériels roulants	maintenance prédictive.
Maintenance prédictive	Réseaux de capteurs, dépôts, CEM. Mesures : température, vibrations, déformations, usure...	Domaine naissant : Besoin de mesures et de détections intégrées au processus de maintenance. Nécessité de fournir une offre globale : de la mesure à l'IHM.
Automobile et domotique	Capteurs ponctuels ou en réseau. Mesures : pression, température, déformations, vibrations, espèces chimiques,... Capteurs : extrinsèques bas coût	La principale limitation est d'ordre économique. Les capteurs doivent impérativement être à très bas coût.

9.5 Métrologie optique dédiée aux écoulements

Jean-Pierre PRENEL et Paul SMIGIELSKI***

** CREST/ CNRS Belfort*

*** Rhenaphotonics Alsace Strasbourg*

Depuis une trentaine d'années, l'utilisation de l'optique dans le but de visualiser, comprendre et caractériser les écoulements de toute nature, s'est développée très rapidement dans tous les pays industrialisés. La communauté scientifique internationale concernée, a décidé de se structurer dès les années 1980, en mettant en place des sociétés *savantes* (*Flow Visualization of Japan, International Flow Visualization Society...*) et des séries de rencontres spécialisées.

Ainsi, dans l'hexagone, à l'initiative de quelques universitaires et de scientifiques de l'ISL et de l'ONERA, est née en 1984, la série de congrès nationaux « *Visualisation en Mécanique des Fluides* » connus aujourd'hui sous le signe FLUVISU. Le congrès annuel du Club « Contrôle et Mesures optiques pour l'Industrie » de la SFO comporte également une session spécifique.

Sur le plan international, deux séries de symposium ont lieu en alternance :

ISFV : International Symposium on Flow Visualization, né à Tokyo en 1978

PSFVIP : Pacific Symposium on Flow Visualization and Image Processing, né à Hawaii en 1997, à l'initiative du PCTFE (Pacific Center for Thermal Fluid Engineering). La dernière édition (PSFVIP4) a d'ailleurs été organisée en France en association avec FLUVISU10.

Thèmes scientifiques

Dans le cadre général de l'investigation optique des écoulements, les activités scientifiques peuvent être scindées en deux thèmes :

Le développement des méthodes optiques de visualisation et caractérisation

Méthodes optiques exploitant les variations d'indice : ombroscopie, strioscopie, interférométrie, holographie

Méthodes tomographiques

Vélocimétries par imagerie de particules (PIV)

Méthodes spécifiques de traitement d'images

Méthodes émergentes : Vélocimétrie Doppler Globale (DGV), Vélocimétrie Volumique (RVV)

Les applications à tout type d'écoulements aéro ou hydrodynamiques

Turbulence et tourbillons

Machines tournantes et applications industrielles

Combustion et transferts de chaleur

Ecoulements diphasiques
Microfluidique
Ecoulements en Sciences du Vivant
Ecoulements à haute vitesse et haute température

D'une façon générale, ces domaines d'activité sont marqués depuis plusieurs années par une stabilité dans les méthodes utilisées : en d'autres termes, les méthodes optiques totalement nouvelles sont rares. Les progrès réalisés concernent le plus souvent l'amélioration des méthodes existantes, poussée parfois jusqu'à un grand raffinement (par exemple, évolution de la PIV : amélioration du traitement des signaux et passage à la stereo-PIV).

Par contre, les domaines d'applications s'étant considérablement diversifiés, l'originalité peut porter sur les résultats obtenus dans un domaine spécifique, même au moyen de méthodes classiques.

Sur le plan de l'originalité des méthodes, trois types d'approche retiennent actuellement l'attention de la communauté :

- la Vélocimétrie Doppler Globale – DGV et la DPV exploitant toutes deux l'effet Doppler sur un champ global, présentent un grand intérêt pour l'analyse quantitative des écoulements rapides (ISL).
- l'interférométrie couleur permet désormais des mesures rapides et précises avec un recalage possible à partir de la frange achromatique (mesures absolues) (ONERA Lille)
- la vélocimétrie volumique avec éclairage « arc-en-ciel » (RVV) représente une véritable approche tridimensionnelle des champs de vitesse dans un volume (*CREST CNRS Belfort*)

Ces trois familles de méthodes possèdent en commun une originalité marquée, un fort potentiel métrologique, mais aussi certaines difficultés de mise en œuvre qui en font d'excellents outils de spécialistes, mais pas encore à caractère industriel.

Sur le plan de l'originalité des applications et des résultats pratiques obtenus, l'association de méthodes variées et très performantes en vue de résoudre des problèmes de caractérisation d'écoulements à micro-échelle constitue aujourd'hui un axe privilégié : la mise en œuvre de techniques très fines comme la microscopie confocale, la fluorescence induite (LIF), les traceurs actifs (MTFV) et la microscopie en réflexion interne totale (TIRFM) permettent une analyse très complète des phénomènes de transport de masse et de chaleur dans les microsystèmes thermofluidiques (USA, Japon). La France présente un retard dans cette approche qui nécessite des moyens onéreux.

Avis sur l'évolution du domaine

Le domaine de l'investigation optique des écoulements connaît actuellement une forte évolution positive liée à plusieurs paramètres :

- les progrès techniques des composants constituant une chaîne d'analyse et de mesure sont continus : sensibilité et résolution des caméras, performances et fiabilité des lasers impulsionnels...

- le développement très conséquent des procédures de traitement des images, dû à la fois au matériel informatique et aux algorithmes utilisés, a « révolutionné » l'exploitation quantitative des champs observés.
- la diversification forte des besoins dans tous les domaines d'activité où la circulation des fluides (isotherme ou non) présente de l'importance, apporte une forte stimulation. Dans les années 1970-80, période de naissance des méthodes aujourd'hui classiques, telles que la tomographie ou la vélocimétrie Laser Doppler, le domaine d'application privilégié restait souvent l'étude des aéronefs en soufflerie. L'industrie des transports terrestres (automobiles ou ferroviaires) est devenue ensuite très demandeuse : aérodynamique externe ou interne (habitacles, échappement), combustion, acoustique.

Aujourd'hui, la plupart des activités scientifiques faisant appel à des fluides sont concernées : génie énergétique, environnement, science du vivant....

Les orientations futures peuvent se résumer en deux points :

- sur le plan des méthodes, il reste à développer de véritables outils de mesures tridimensionnelles à partir des solutions actuellement émergentes en laboratoire. Si l'extraction des trois composantes d'un champ de vitesse est actuellement bien maîtrisée au voisinage d'une « tranche » d'écoulement (méthodes dites 3C, telles que la stereo PIV), il n'en est pas de même dans un véritable volume (méthodes réellement 3D). Même si l'holographie de particules a déjà fait ses preuves dans l'analyse de volumes réduits, il reste beaucoup à faire en termes d'augmentation du champ d'analyse et de facilité de mise en œuvre.
- sur le plan des domaines d'applications les plus porteurs, il apparaît clairement que les Sciences du Vivant représentent un axe futur d'activités très important.

Une autre motivation très forte, induite par la tendance générale à la miniaturisation des systèmes, est l'adaptation des méthodes existantes aux échelles réduites, ou la mise au point de méthodes spécifiques totalement nouvelles de micromesures (voire de nanomesures ?). Ce dernier terme est toutefois à considérer avec précaution dans le cadre présent, même s'il est très « tendance ».

Ce domaine de recherche présente donc des perspectives intéressantes pour les années à venir. Le temps est loin désormais où l'on prévoyait (pour l'an 2000 !) la disparition totale de l'expérimentation au profit des seules simulations. Aujourd'hui, l'équilibre s'est rétabli : les fantastiques progrès de la simulation numérique ont permis des avancées spectaculaires et les méthodes d'investigation ont su trouver leur place, en parallèle, comme moyen de recalage ou même comme seul moyen d'analyse dans les cas où la simulation n'est pas encore en mesure de répondre à la question posée.

Conclusion

L'organisation conjointe de PSFVIP4 et FLUVISU10 sur un site français en 2003 a été également l'occasion de confirmer la « bonne santé » du domaine scientifique d'activité et le positionnement très honorable des chercheurs français.

La communauté scientifique la plus nombreuse et la plus active reste essentiellement japonaise (*lors de l'édition PSFVIP3 à Hawaii, elle représentait 60 % des participants, le site choisi n'étant toutefois pas sans influence*). Il faut par contre noter la forte émergence de la Chine, de Taïwan et de la Corée du Sud.

9.6 Télémétrie laser

*T. BOSCH
ENSEEIH T Toulouse*

On se propose d'utiliser ce terme pour désigner toutes les techniques de mesure de distance absolue (par rapport à la distance relative ou déplacement) utilisant une source laser et pour des applications en contrôle industriel. On peut citer dans ces techniques :

- Le temps de vol (radar optique ou lidar, mesure par déphasage, FWCW)
- La triangulation
- L'interférométrie laser

sans parler de toutes les déclinaisons possibles de ces techniques pour des mesures dimensionnelles (vision 3D, mesure d'épaisseur, contrôle de niveaux, d'alignement, de position, ...).

Pourquoi les techniques de l'optique ?

Lorsqu'une onde acoustique ou électromagnétique illumine une surface quelconque, une fraction de l'énergie est réfléchiée ou rétrodiffusée dans l'espace du demi plan de cette surface. Pour distinguer cette surface cible de tout l'environnement dans laquelle elle est placée, il est nécessaire que la majorité de la puissance de l'onde incidente soit en interaction avec la cible, afin d'obtenir une analyse quasi-ponctuelle. Si la distance à mesurer est grande en comparaison de la dimension de la cible à détecter, il est nécessaire que le faisceau incident d'analyse soit de faible section et peu divergent. Ceci peut être indispensable lorsque la puissance d'émission est relativement faible et doit encore satisfaire le rapport signal sur bruit du bilan de liaison. Une faible divergence du faisceau d'analyse sera obtenue lorsque la pupille de la source est de grande section en comparaison de la longueur d'onde, ce qui donnera une faible diffraction du faisceau d'analyse. Grâce aux diodes laser, les techniques optiques dont la longueur d'onde est proche de $1\mu\text{m}$ permettent de fournir à la fois des faisceaux de faible divergence et de forte puissance par des dispositifs d'encombrement réduit.

Importance industrielle

Les industries manufacturières ont fortement évolué au cours de ces dernières années suite à la généralisation de la *gestion de production* incluant le *contrôle qualité*, notamment par le biais de cartes de contrôle permettant de piloter la production (Maîtrise Statistique des Procédés). Ainsi, il est indispensable de disposer d'outils de mesure et contrôle de plus en plus fiables et sophistiqués, afin de permettre la mise en place d'une démarche qualité permettant d'anticiper la production de rebuts, d'augmenter la productivité des postes de travail, d'effectuer une maintenance préventive/prédictive ou encore d'améliorer la traçabilité du processus de fabrication.

Des besoins actuels

Deux besoins sont exprimés de manière récurrente par les utilisateurs :

- disposer d'un capteur optique à *faible coût*, sans nécessité de préparer la cible, avec une précision millimétrique
- disposer d'un capteur de *grande précision* (de l'ordre de $5\sigma m$)

Dans ces deux cas, la gamme de distance à mesurer varie de quelques centimètres (20 environ) à plusieurs mètres (entre 5 et 15). On peut généraliser en affirmant que le besoin dans la gamme variant de 1 à 10 mètres est le plus avéré actuellement.

D'autres besoins sont cependant exprimés en dehors du domaine du contrôle industriel :

- sécurité routière : gestion d'interdistance, anticollision (gamme jusqu'à 100 m pour au moins réduire la vitesse du véhicule avant impact), aide à la conduite, ...
- spatial : positionnement inter-satellite, alignement de miroirs de télescopes
- médical : position de la tête de patients dans les scanners, analyse des mouvements pour la rééducation, entraînement des sportifs, ...

Il existe aujourd'hui des techniques optiques susceptibles d'avoir un apport énorme dans l'ensemble de ces domaines. Cependant il s'avère que les techniques optiques de mesure et contrôle ne sont implantées qu'assez marginalement en milieu industriel. En effet, outre le coût (achat, maintenance) souvent important de ces techniques, les utilisateurs sont réticents du fait des problèmes rencontrés lors de la mise en œuvre de systèmes à base de laser (l'environnement industriel peut souvent être considéré comme hostile : poussière, huile, CEM, vibrations, accessibilité restreinte, ...). Par ailleurs, de tels capteurs ne sont pas toujours homologués d'un point de vue normatif.

Le congrès annuel du club CMOI (contrôle et mesures optiques pour l'industrie) consacre depuis trois ans une session à la télémétrie.

Une faiblesse française : peu de fabricants

Les fabricants d'appareils de mesure et de contrôle dans les domaines évoqués sont peu nombreux en France. Si l'on exclut les applications spatiales et militaire pour se concentrer sur le contrôle industriel, on trouve principalement des distributeurs de matériels allemands, américains, japonais et anglais. Une conséquence est que dans ce domaine aussi, la recherche française qui est d'un niveau très convenable ne débouche que rarement sur des systèmes industrialisés par un industriel français. Les industriels français sont souvent des PME dont l'activité est centrée sur un seul produit optique éventuellement décliné en différentes options. D'autres industriels ont davantage une approche de bureau d'études, réalisant, à la demande, des dispositifs en faible quantité.

Une cause possible : l'éloignement des communautés opticiennes, électroniciennes et mécaniciennes

Ces communautés scientifiques sont traditionnellement fort éloignées en France, ce qui n'est pas toujours le cas dans le reste de l'Europe. L'enseignement de l'optique est inexistant dans bon nombre d'écoles d'ingénieur en électronique (certes, l'optoélectronique est enseignée mais souvent du seul point de vue des composants à semi-conducteur) et les opticiens n'ont que des notions succinctes de mécanique et d'électronique. En réalité, ces trois thématiques

sont complémentaires et indispensables à la réalisation de dispositifs de mesure (on pourrait aussi inclure le traitement du signal comme quatrième composante).

Suggestions

Continuer à favoriser le transfert de technologie et à encourager l'innovation dans les entreprises, en particulier par l'augmentation des bourses CIFRE et d'autres types de financements permettant aux chercheurs de s'impliquer dans l'activité de transfert industriel. Mettre en place un mécanisme permettant aux chercheurs de valoriser au niveau de leur carrière une activité de transfert de technologie.

Encourager l'enseignement de l'optique dans les Écoles d'ingénieur, en particulier celles relevant du domaine de l'électronique.

Encourager et soutenir les actions susceptibles de maîtriser les aspects métrologiques des systèmes de mesure. La France peut encore faire des avancées dans ce domaine et prendre un avantage concurrentiel par l'initiation de normes. A ce titre, en tant que président du comité technique international sur les systèmes optiques pour IEEE Instrumentation and Measurement, je suis prêt à favoriser toute initiative française dans le domaine.

9.7 La microscopie en champ proche

Pascal Royer
LNIO UTT

Principe et descriptif de la microscopie optique en champ proche appelée plus couramment sous l'acronyme anglais SNOM (Scanning Near Field Optical Microscopy).

La résolution latérale théorique d'un microscope optique classique est de l'ordre de grandeur de $\lambda/2$, c'est à dire de la demi-longueur d'onde de la lumière d'éclairage. Elle est calculée précisément à partir du critère de Rayleigh disant que deux points objets sont résolus si le maximum principal de l'une des images coïncide avec le premier minimum de l'autre.. Elle est donnée par l'expression $1,22\lambda/2ON$ où ON est l'ouverture numérique de l'objectif imageur, pouvant être supérieure à 1 mais inférieure en général à 1,4 avec un objectif à immersion. Cette résolution est donc théoriquement au mieux de l'ordre de 200 à 400 nm dans le visible. Dans la pratique, à cause des défauts résiduels des lentilles, cette limite se situe typiquement aux environs de 500 à 1000 nm (0,5 à 1 μ m) et exceptionnellement comprise entre 200 et 300 nm en microscopie confocale.

Pour dépasser la limite de résolution imposée par le critère de Rayleigh, une condition nécessaire est de pouvoir détecter les composantes non radiatives du champ électromagnétique, dites ondes évanescentes car elles "s'évanouissent" en suivant une loi exponentielle au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la surface observée.

Le champ diffracté par un objet de taille beaucoup plus grande que la longueur d'onde d'excitation ne contient essentiellement que des ondes homogènes ou radiatives se propageant idéalement sans atténuation. Pour de tels objets, une lentille en champ lointain peut capter toutes ces ondes et restituer une image correcte de l'objet (cas de l'imagerie optique classique). Lorsque la taille de l'objet se rapproche de la longueur d'onde du faisceau d'éclairage, le champ diffracté est alors constitué, en plus des ondes radiatives, d'un nouveau type d'ondes appelées ondes évanescentes. Ces ondes non propagatives, ont une intensité lumineuse qui décroît exponentiellement en fonction de la distance à l'objet, et l'énergie de ces ondes n'est plus mesurable dès que l'on s'éloigne de plus d'une demie longueur d'onde de l'objet. On ne peut donc pas capter les informations qu'elles contiennent sur les détails sub-microniques de l'objet avec un objectif classique.

Ces ondes évanescentes sont créées par diffraction, par un objet de taille inférieure à la demi-longueur d'onde, des ondes radiatives utilisées pour l'éclairage de la surface à analyser. Si l'on s'appuie sur le principe du retour inverse de la lumière, on peut théoriquement par diffraction des ondes évanescentes par un objet de même taille (inférieure à la demi longueur d'onde), créer à nouveau des ondes radiatives, alors détectables par un système optique traditionnel (lentille). Ces ondes radiatives issues de la diffraction d'ondes évanescentes vont donc comporter les informations optiques d'origine sub-longueur d'onde de la surface étudiée et

permettront ainsi d'obtenir une résolution latérale bien inférieure à la limite de Rayleigh. Ces ondes évanescentes, confinées dans une zone "géographique" très proche de la surface d'un objet (jusqu'à une distance d'environ $\zeta/2$ de la surface), s'appelle le champ proche optique de l'objet, d'où l'appellation de microscopie optique en champ proche ou Scanning Near field Optical Microscopy en anglais (SNOM).

E.H. Synge en 1928 fut le premier à proposer une configuration afin d'extraire l'information optique en champ proche d'une surface. Des verrous technologiques n'ont pu à cette époque permettre une réalisation expérimentale de la configuration proposée par Synge qui consistait à d'éclairer la surface d'un échantillon à travers un trou de taille sub-longueur d'onde réalisé dans un écran métallique et utilisé comme nano-source optique, nano-source devant être positionnée avec précision à une distance sub-longueur d'onde de la surface à étudier. A l'époque, réaliser une telle nano-source et contrôler sa position à une fraction de longueur d'onde de la surface à étudier étaient technologiquement impossibles.

En 1972, l'idée de Synge a été validée par E. Ash et G. Nicholls dans le domaine des micro-ondes ($\zeta=3\text{cm}$). Une résolution de $\zeta/60$ fut obtenue en utilisant une ouverture de 0,5 mm placée à 0,5 mm de l'échantillon constitué de motifs d'aluminium déposés sur un substrat de verre.

Le développement des microscopies à sonde locale telles que le STM (Scanning Tunneling Microscopy) et l'AFM (Atomic Force Microscopy) début des années 80 a permis dans le domaine de l'optique la levée des verrous technologiques précédemment cités. C'est ainsi que l'invention du microscope électronique à effet tunnel à balayage, par G. Binnig et H. Röhrer d'IBM Zurich (prix Nobel de physique 1986) est fort probablement à l'origine de la première configuration de SNOM proposée en 1984 par D. W. Pohl & al, à l'époque également Chercheur à IBM Zurich, configuration atteignant une résolution de $\zeta/20$, soit environ 25 nm à une longueur d'onde de 488nm. La sonde utilisée fut réalisée dans un morceau de quartz taillé chimiquement en pointe dont les côtés étaient recouverts d'un film mince d'aluminium. La nano-ouverture optique ainsi réalisée en extrémité de sonde fut utilisée comme nano-source pour éclairer l'échantillon. Depuis de nombreuses configurations de SNOM ont été proposées. Il apparaît aujourd'hui une classification identifiant deux grandes familles de SNOM. Cette classification s'appuie essentiellement sur le type de sonde utilisée. On distingue les SNOM à sonde à ouverture optique et les SNOM à sonde sans ouverture optique. Dans le premier cas, la sonde est typiquement une fibre optique effilée métallisée pouvant jouer le rôle de nano-source ou celui de nano-détecteur ; dans le deuxième cas, une sonde en matériaux massif (diélectrique, semi-conductrice de type AFM ou métallique) joue le rôle d'un nano-objet transformant par diffraction les ondes évanescentes du champ proche de l'échantillon en ondes propagatives pouvant alors être détectées classiquement en champ lointain par un objectif de microscope.

Les principaux acteurs :

-du milieu scientifique :

- Au niveau national :

Au milieu des années 80, trois équipes françaises (1-2-3, voir liste ci-dessous) ont été parmi les premières au niveau international à proposer des configurations expérimentales originales en optique de champ proche, situation ayant à l'époque conféré à la France une position privilégiée dans ce domaine. Depuis, de nombreuses équipes françaises se sont intéressées à ce nouveau domaine de l'optique. La liste qui suit, sans qu'elle soit exhaustive, extraite de celle des laboratoires faisant partie du groupe thématique 5 "dispositifs et composants en champ proche" du GDR "ondes"

créé en 2002 par le département STIC du CNRS, donne un panorama des principaux acteurs français du domaine :

(1) Besançon - LOPMD (Daniel Courjon)
Besançon - LPM (Jean Marie Vigoureux)
Chatenay Malabry - ECP/EM2C (Jean Jacques Greffet)
(2) Dijon - LPUB/OCP (Frédérique de Fornel)
Dijon - LPUB/Optique Submicronique (Alain Dereux)
Grenoble - LSP (Serge Huant)
Grenoble - LEPES/CNRS (Thomas Lopez Rios)
Grenoble - Laboratoire Louis Neel/CNRS (Yves Souche)
Montpellier CEM2 (Michel Castagné)
Mulhouse - DPG/CNRS (Daniel Loughnot)
Nancy - LCPE (Bernard Humbert)
Orsay - LAC (Anne Debarre)
Palaiseau - LPMC (Jacques Peretti)
(3) Paris - LOP / ESPCI (Claude Boccara)
Reims - LMET/UTAP (Michel Troyon)
Toulouse - CEMES (Christian Girard)
Troyes - LNIO/UTT (Pascal Royer)
Villeurbanne - NanOpTec / CNRS - INSA - ECL - UCLB (Bernard Jacquier)

- *Au niveau international :*

Les premières configurations de microscope optique en champ proche ont été à l'origine d'un fort engouement à l'échelle internationale pour cette nouvelle technique, suscitant de nombreuses expériences à travers le monde. C'est ainsi que les principaux pays européens (Allemagne, Angleterre, Autriche, Belgique, Danemark, Espagne, Italie, Hollande, Suisse) ainsi que les Etats Unis et le Japon contribuent depuis plus d'une quinzaine d'années au développement d'une instrumentation riche en configurations expérimentales ainsi qu'à de nombreux travaux théoriques et de modélisation, ces différentes études permettant aujourd'hui à l'optique en champ proche d'être incontournable dans l'étude par voie optique des propriétés physico-chimiques des objets et matériaux à l'échelle sub-longueur d'onde et par conséquent à l'échelle nanométrique.

La liste qui suit, bien que non exhaustive, donne toutefois un panorama des principaux acteurs dans le monde :

AMERIQUE :

- *USA :*

Columbia University (David M Adams) - University of Kansas (Robert C. Dunn) - Boston University (Bennett Goldberg) - NIST (David J. Nesbitt) - North Carolina State University (Michael Paesler) - Harvard University (Sunney X. Xie) - University of Rochester (Lukas Novotny) - University of Illinois (Paul Carney) - Argonne National Laboratory (Gary P. Wiederrecht)

- *Canada :*

National Research Council / Ottawa (R. S. Taylor)

ASIE :

- *Corée* :

Seoul National University (Wonho Jhe)

- *Japon* :

Osaka University (Satoshi Kawata) - Tokyo Institute of Technology (Motoichi Ohtsu)

EUROPE :

- *Allemagne* :

University of Muenster (Ulrich Fischer) - Max Planck Institute for Biochemistry / München (Fritz Keilmann) - Max Planck Institute for Biophysical Chemistry / München (Stefan W. Hell) - Max Born Institute/ Berlin (Christoph Lienau) - University of Siegen (Alfred Meixner) - PTB Braunschweig (Hans-Ulrich Danzebrink) - LZH hannover (Boris Chichkov) - ISAS - University of Dortmund (Volker Deckert) - University of Ulm (Othmar J. Marti) - University of Technology Dresden (L. M. Eng)

- *Angleterre* :

King's College London (David R. Richards) - University College London (Franco Cacialli)

- *Autriche* :

University of Graz (Joachim R. Krenn)

- *Belgique* :

University of Leuven (Frans De Schryver)

- *Danemark* :

Aalborg University (Serguey I. Bozhevolnyi)

- *Espagne* :

CSIC Madrid (Manuel Nieto-Vesperinas)

- *Hollande* :

University of Twente (Niek F. Van Hulst)

- *Irlande* :

The Queen's University of Belfast (Anatoly Zayats)

- *Israël* :

Nanonics Imaging Ltd. / Jerusalem (Aaron Lewis)

- *Italie* :

INFM Pi+Me / Geneva (Maria Allegrini)

- *République Tchèque* :

Brno University of technology (Paval Tomanek)

- *Suisse* :

University of Basel (Dieter W. Pohl - Bert Hecht) - EPFL Lausanne (Olivier Martin) - CSEM Neuchâtel (Harry Heinzelmann) - ETH Zurich (Vahid Sandoghdar - Renato Zenobi) - Institute of Microtechnology, University of Neuchâtel (Luciana Vaccaro)

- Position de la France dans le contexte international :

Si la place de la France semblait être assez privilégiée en optique de champ proche jusqu'à la fin des années 80, aujourd'hui la situation est différente. En effet, dans le domaine de l'instrumentation duquel relève essentiellement cette nouvelle technique, l'engouement précédemment évoqué associé à de forts investissements financiers ont permis à certains pays de lancer la fabrication d'instruments aujourd'hui commercialisés. Dans les laboratoires français, de nombreux prototypes instrumentaux existent mais encore une fois, il semble que la France n'a pas su démarrer suffisamment tôt des actions de transfert de technologie. Toutefois, le niveau scientifique de la recherche française dans ce domaine a évolué de telle sorte que l'excellence est toujours présente.

- du milieu industriel :

Depuis quelques années, une société américaine, VEECO, fabricant d'équipements de procédés et d'appareils de métrologie, ainsi qu'une société allemande, OMICRON, fabricant d'instruments d'analyse des surfaces sous ultra vide, proposent plusieurs versions de microscope optique en champ proche. D'autres petites sociétés se sont créées pour fabriquer et commercialiser des SNOM. Citons les principales : WITEC (Allemagne), NANONICS (Israel), NTMDT (Russie), NANOTECH (Espagne), DME (Danemark).

Dans le milieu industriel, l'utilisation de la microscopie optique en champ proche est pratiquement inexistante. Si les AFM et STM sont de plus en plus présents en milieu industriel, principalement au sein des laboratoires de R&D de grands groupes, le SNOM semble ne pas avoir un niveau de maturité suffisant pour être introduit dans l'industrie, seuls les laboratoires publics disposent de tels outils (quelques dizaines d'appareils commerciaux sont actuellement installés en France). Ce constat est valable à l'échelle internationale.

La microscopie optique en champ proche doit encore faire ses preuves et surtout montré des résultats probants dans des domaines applicatifs auxquels s'intéresse l'industrie. D'un point de vue technologique, il semble que la fabrication en masse des sondes de type AFM avec une bonne reproductibilité, de bonnes performances et un coût raisonnable ait été un des points forts ayant permis l'introduction de l'AFM en milieu industriel. Les pointes typiquement utilisées en microscopie optique en champ proche ne sont pas arrivées à ce stade d'une réelle industrialisation. Elles posent même encore de nombreux problèmes aux chercheurs. De plus, même si d'année en année, il y a de belles avancées scientifiques, les résultats de la recherche montrent que cette technique pose encore des problèmes en terme d'interprétation.

Les potentialités du SNOM pour son passage en milieu industriel dépendront bien évidemment du rythme des avancées scientifiques et technologiques encore nécessaires. Un horizon à 3 à 5 ans peut être envisagé pour ce passage.

Les principaux axes et domaines de recherche de l'optique en champ proche :

Le SNOM, à son origine, a surtout été pressenti comme un instrument qui permettrait l'observation par voie optique, au sens de l'imagerie, des surfaces avec une résolution bien inférieure à celle atteinte par la microscopie optique classique. En fait, il s'avère que c'est la spectroscopie locale des surfaces qui occupe aujourd'hui une place prépondérante au niveau des recherches dans ce domaine. En effet, au début des années 90, des travaux de recherche ont démontré la possibilité d'étudier par SNOM les propriétés physiques et chimiques des molécules à l'échelle individuelle, dans un premier temps grâce à une spectroscopie de fluorescence. Cette démonstration a incité les biologistes, les chimistes et les physiciens à utiliser le SNOM comme outil permettant une spectroscopie locale des surfaces et plus généralement des matériaux. Depuis, de nombreux résultats ont été obtenus, que ce soit en spectroscopie d'absorption, de fluorescence, en spectroscopie Raman, faisant de cette spectroscopie sub-longueur d'onde, un des principaux axes de recherche du SNOM. Il en existe toutefois de nombreux autres associés à des domaines applicatifs divers et variés. Citons les principaux :

- la nanostructuration des surfaces de divers matériaux (organiques et inorganiques, diélectriques, semi-conducteurs et conducteurs) pour le stockage de l'information à très haute densité, mais également comme nouvelle technique de nanophotolithographie pour la micro et nanoélectronique,
- la caractérisation des structures photoniques, des composants optoélectroniques ainsi que de ceux de l'optique guidée intégrée (profil de modes de propagation, profil d'intensité du champ électromagnétique, cartographie d'indices effectifs, suivi d'impulsions ultra courtes, profil d'émission de sources lasers,...),
- le domaine de la plasmonique pour lequel le SNOM est un outil d'analyse des résonances plasmons à une échelle locale (spectroscopie SERS : Surface Enhanced Raman Scattering pour l'étude des matériaux, mais également nouveaux nanocapteurs bio-chimiques à plasmons de surface,...),
- les sondes pour l'optique en champ proche,
- effets de pointe et confinement électromagnétique,
- optique non linéaire à l'échelle sub-longueur d'onde,
- théorie et modélisation de l'optique en champ proche.

Les congrès et manifestations diverses :

- La communauté de l'optique en champ proche organise en moyenne tous les 18 mois un congrès international spécifique à ce domaine réunissant la plupart des acteurs internationaux. Le premier eu lieu en France à Arc et Senans en 1992 (NFO 1), réunissant à l'époque une quarantaine de chercheurs, le dernier en date eu lieu en août 2002 aux Etats-Unis à Rochester (NFO 7) réunissant environ 250 chercheurs, celui de Shirahama au Japon en 1998 (NFO 5) ayant réuni près de 350 chercheurs. Le prochain aura lieu en Corée à Séoul en principe fin 2004.

- La première école thématique "optique en champ proche" a été organisée en mars 2000 à La Londe les Maures par le GDR "Optique en Champ Proche". De cette école, a été réalisé un ouvrage référencé ci-après.

- Le groupe thématique 5 "dispositifs et composants en champ proche" du GDR "ondes" créé en 2002 par le département STIC du CNRS organise régulièrement des réunions (voir site web : www.ondes.fresnel.fr).

- Le Cercle Français des Microscopies en Champ Proche (CFMCP), composante de la Société Française des Microscopies, organise annuellement un colloque sur les microscopies à sonde locale, le dernier ayant eu lieu en 2003 à Toulon.

- Annuellement, est également organisé le Forum des microscopies à sonde locale. La 6^{ième} édition a eu lieu à la Grande Motte en mars 2003. En parallèle, fut organisée la première école thématique CNRS "Nanosciences et sondes locales". La 7^{ième} édition du forum ainsi que la 2^{ième} édition de l'école thématique CNRS auront lieu en mars 2004 à Ax les Thermes - Bonascre en Ariège.

Les organismes :

Les principaux organismes nationaux au sein desquels l'optique en champ proche est représentée sont :

- Le groupe thématique 5 "dispositifs et composants en champ proche" du GDR "ondes" (www.ondes.fresnel.fr).
- Le CFMCP (site web en construction)
- Le club Nano-MicroTechnologie (www.clubnano.asso.fr)

Quelques références bibliographiques :

Les quelques références ci-dessous concernent des articles ou ouvrages donnant une vue générale sur le domaine de l'optique en champ proche. Leur propre bibliographie permettra au lecteur d'identifier une multitude d'autres articles et ouvrages sur le sujet à l'échelle internationale.

Livres :

- D. Courjon et C. Bainier, *"Le champ proche optique : théorie et applications"* - collection technique et scientifique des télécommunications - Springer 2001.
- F. De Fornel, *"Les ondes évanescentes en optique et en optoélectronique"* - collection technique et scientifiques des télécommunications - Eyrolles 1999.

Article :

J. J. Greffet et R. Carminati, *"Image formation in near field optics"* Progress in Surface Science, 1997, vol. 56, n°3, 133-237.

A consulter les actes de la dernière conférence internationale sur le champ proche optique : NFO 7 - The 7th international Conference on Near-field Optics and Related Techniques - University of Rochester - USA - August 11-15, 2002.