

Chapitre 5

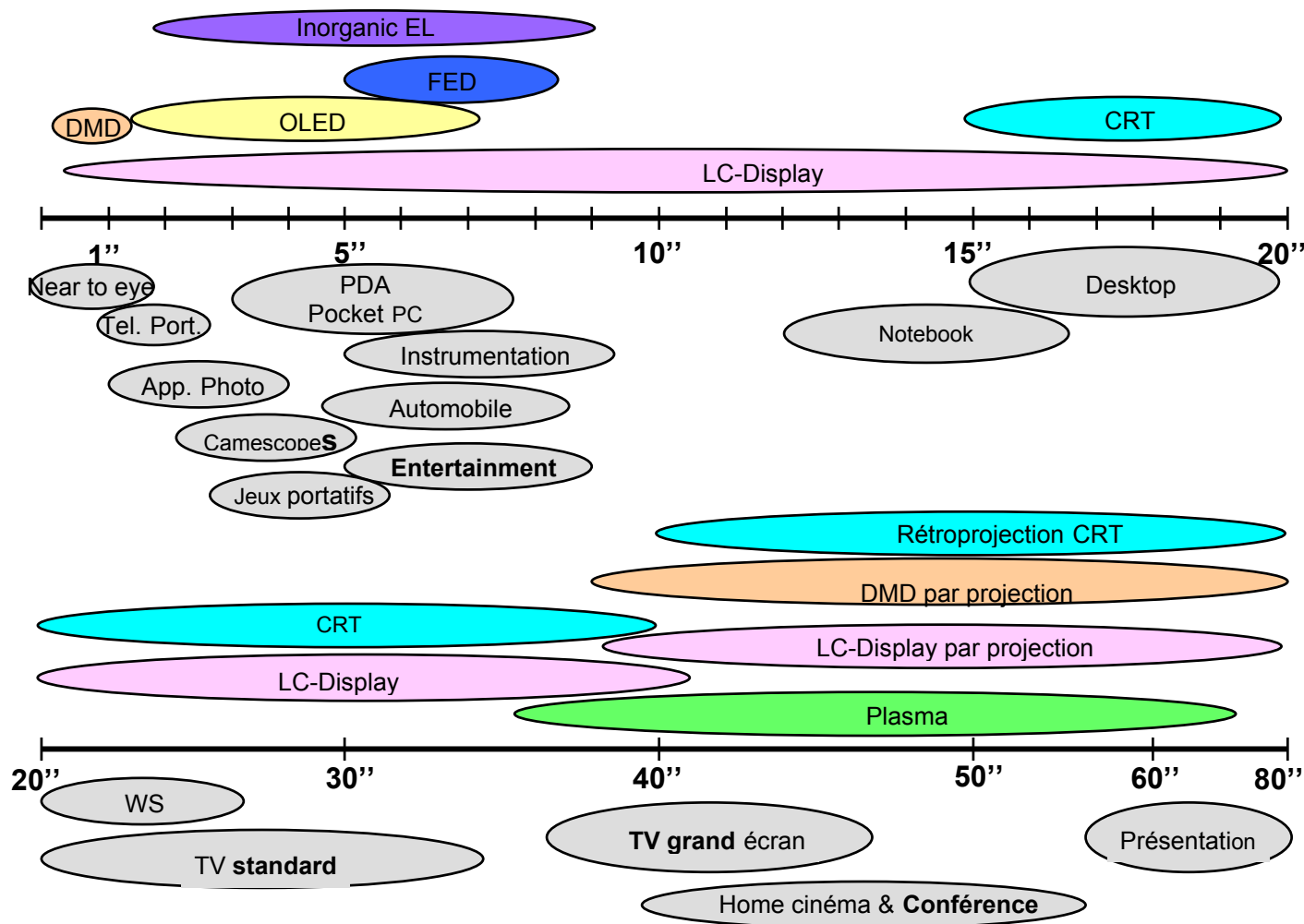
VISUALISATION, HOLOGRAPHIE, TRAITEMENT OPTIQUE de L'IMAGE

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

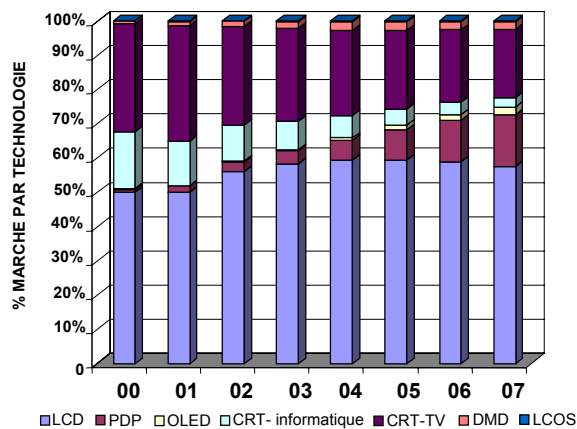
Le marché global de l'affichage a dépassé les 40 milliards d'euros en 2002 et devrait atteindre près de 70 milliards d'ici 2006³. La répartition des parts de marché pour les composants ou modules nus est donnée dans le diagramme ci-dessous.



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, Pionner, 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 μ s),
- 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. Lebarney 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 :

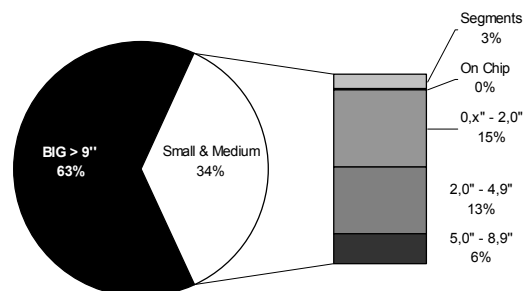
- la bi-stabilité dans les cristaux liquides par effets d'ancrage de ZBD (UK) ou Nemoptic en France avec un exemple tout à fait remarquable de transfert industriel vers l'Asie,
- l'électrophorèse (SIPIX, E-Ink en collaboration avec Philips), ou plus émergent encore avec des effets à base de MEMS (Iridigm).

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 :



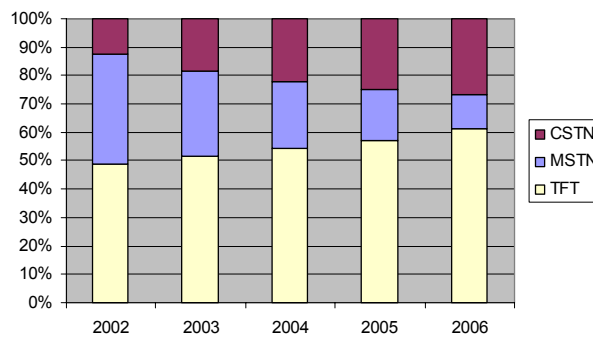
En revanche, le ratio en unités est inverse puisque les écrans de moins de 9'' (y compris les afficheurs dédiés) représente 2.4 milliards d'écrans livrés¹¹ contre 67 millions. En 2003, les afficheurs pour téléphonie mobile représentent plus de 42% du segment des petits écrans. Les autres applications 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 réplique 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 réplique 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, Illford 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 4,6×4,6 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 2000×2000 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 événements 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 LED²⁰).

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.*

5.1 Afficheurs de petits et moyens formats

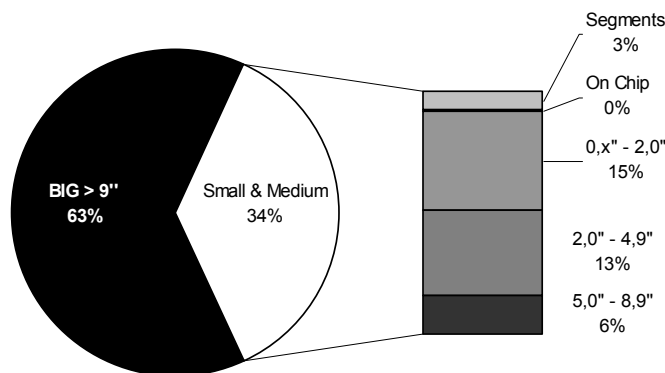
*Cécile JOUBERT – Amaury LE JEMTEL
NEMOPTIC*

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

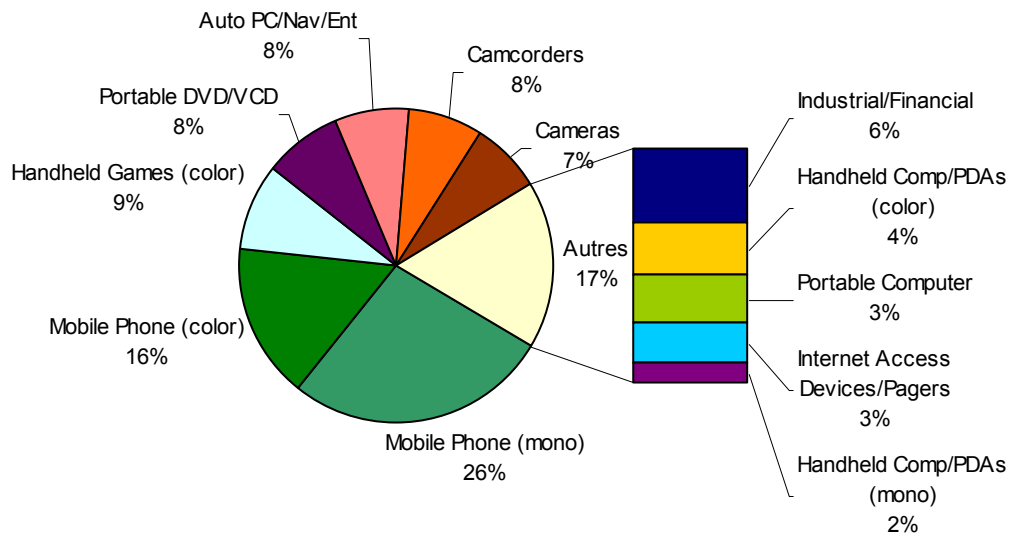
Le marché des LCD est clairement dominé en valeur par les écrans de grande taille. En revanche, en unités, le ratio est inverse, les écrans de moins de 9’’ représentent 97% des écrans livrés soit environ 2.4 milliards d’écrans contre 67 millions.



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

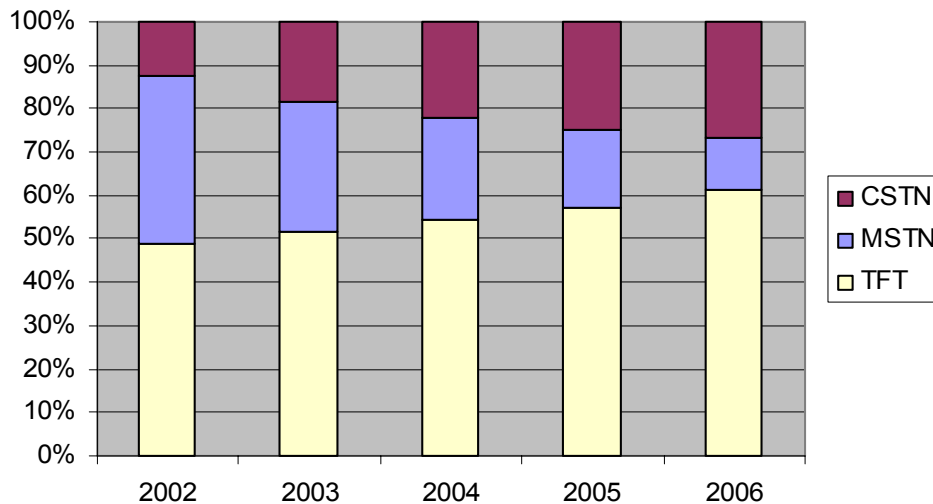
Les afficheurs pour téléphonie mobile représentent à eux seul plus de 42% de cette catégorie d'écrans. Plusieurs autres applications, essentiellement grand public (jeux, lecteur DVD, appareils photos et caméscopes) et automobile, se situent autour de 7 à 10% de part de marché chacune.

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.

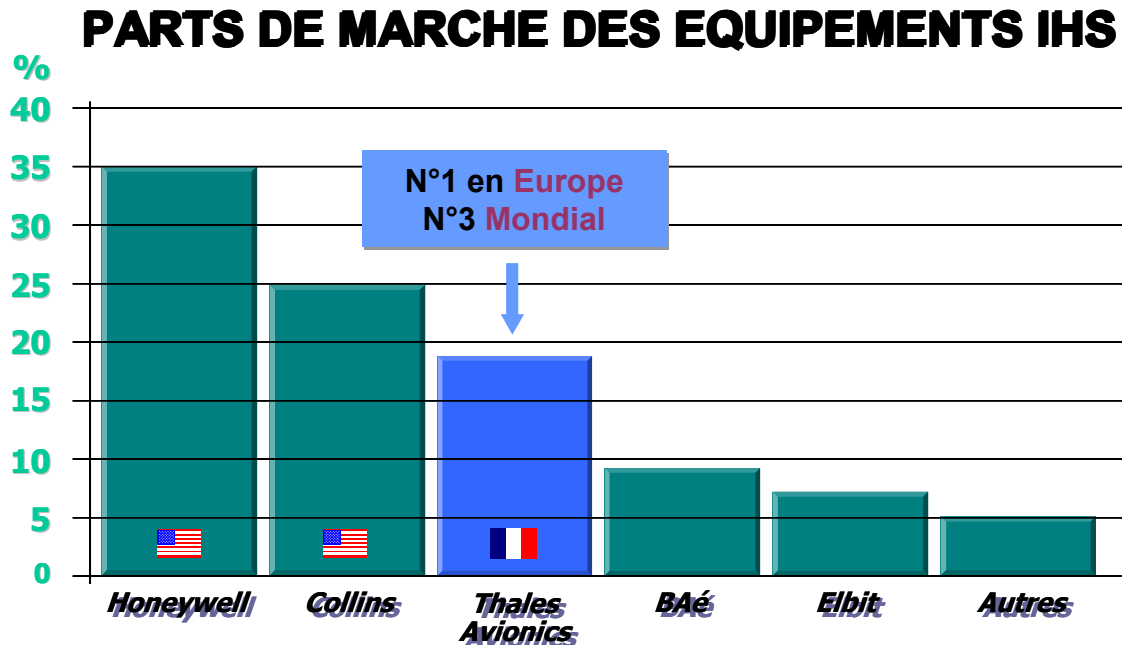
Les technologies utilisées dépendent du type d'équipement :

- 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 ($\sim 100\text{nm}$), 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 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 adapté 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. Lebarney sur « l'électroluminescence organique » du TomeII

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 constatations 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 décennie 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-Pétersbourg 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.

Stéréogrammes 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 Amator (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 être 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 (LiNbO₃) 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 10⁴). 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 1636×1238 pixels chacun de taille $3,9 \times 3,9$ 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 4,6×4,6 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. 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.