

**LES CRISTAUX LIQUIDES FERROÉLECTRIQUES ET LEUR UTILISATION EN OPTOÉLECTRONIQUE****J.-P. LE PESANT***THOMSON-CSF, Laboratoire Central de Recherches, Domaine de Corbeville, F-91404 Orsay Cedex, France***RESUME**

La découverte de la ferroélectricité dans les cristaux liquides smectiques C chiraux, en 1975, a conduit à un nouvel effet électrooptique induit par un couplage linéaire entre la polarisation électrique permanente des molécules et le champ électrique d'adressage. Les cristaux liquides ferroélectriques permettent une réduction d'au moins 3 ordres de grandeur du temps de commutation par rapport aux nématiques en hélice traditionnels, et permettent l'obtention d'états stables permanents utilisés pour des effets à mémoire (stabilisation par effet de surface pour les cellules de faible épaisseur et stabilisation en courant alternatif pour les cellules de faible et moyenne épaisseur).

Tout ceci a ouvert la voie à toute une gamme de dispositifs nouveaux et plus rapides qui s'étendent des écrans de visualisation fortement multiplexés jusqu'aux obturateurs optiques.

Après quelques rappels sur les structures de phases des cristaux liquides, nous présentons les caractères spécifiques des cristaux liquides ferroélectriques. Nous exposons ensuite les propriétés de bistabilité par effet de surface et par maintien en champ électrique alternatif. Nous aborderons l'aspect matériaux par la description des tendances actuelles dans la synthèse des matériaux et l'ancrage moléculaire. Nous donnerons quelques éléments sur la technologie de fabrication des cellules. Après un bref exposé sur les écrans de visualisation à cristaux liquides ferroélectriques, nous décrirons plusieurs dispositifs électrooptiques rapides tels qu'obturateurs et modulateurs optiques. Nous verrons que des dimensions de points de l'ordre de la dizaine de micromètres et des temps de commutation inférieurs à 20 microsecondes sont maintenant obtenus dans les laboratoires. De nombreuses références bibliographiques sont données en annexe.

**ABSTRACT**

The discovery of ferroelectricity in smectic C liquid crystals, in 1975, has introduced a new electrooptic effect, driven by linear coupling between the permanent electric polarization of chiral smectic C molecules and the addressing electric field. Ferroelectric liquid crystals allow a reduction of at least 3 orders of magnitude of the switching time with respect to conventional twisted nematics and yield permanent stable states used for memory effects (surface stabilization for small thickness cells and AC stabilization for small and medium thickness cells). All this has open the way to new and faster devices ranging from highly multiplexed displays to optical shutters. This paper describes the present trends in material synthesis, molecular anchoring and device fabrication. New mixtures have been prepared in several laboratories, which yield low viscosity materials by using high polarity chiral molecules as dopants. Response times of less than 40 us are currently obtained and lower ones are foreseeable. Small pitch (less than 50 um) optical shutters are described and applications such like line printers, light modulators and optical gate arrays will be discussed.

### INTRODUCTION

Les cristaux liquides ont maintenant à peine plus de cent ans, puisque c'est en 1988 que Reinitzer découvrit des phases de matière condensée qui présentent des propriétés physiques intermédiaires entre celles des solides et celles des liquides. Elles ont été appelées depuis mésophases ou plus communément "cristaux liquides". Les physiciens les ont reconnues comme de véritables états thermodynamiques et ont étudié en détail leur structure et leur comportement aussi bien du point de vue théorique qu'expérimental. L'une de ces phases, la phase nématique, qui est obtenue avec de nombreux matériaux, purs ou en mélanges, est maintenant largement utilisée dans l'état dit "nématique en hélice", dans les montres, les calculatrices de poche, les microordinateurs portables, les télévisions à cristaux liquides etc... D'autres phases, en particulier les phases smectiques, permettent des temps de réponse plus courts, des angles de vue très larges, des dimensions de points très faibles et des états mémoires intrinsèques ou entre eux. Le but de ce cours était de décrire quelques uns des progrès qui ont été faits dans la maîtrise des matériaux, de l'orientation moléculaire, de la technologie des cellules et des effets électrooptiques. Ces progrès permettent maintenant la fabrication d'obturateurs optiques rapides et compacts utilisables dans des applications telles que traitement de faisceau, modulateurs optiques et barrettes pour imprimantes électrooptiques.

### STRUCTURE ET SYMETRIE DES CRISTAUX LIQUIDES

De nombreuses molécules organiques présentent des phases cristal liquide, soit elles-mêmes à l'état pur, soit à l'état de mélange avec d'autres molécules qui ne présentent pas intrinsèquement l'état mésomorphe. Deux grandes classes sont actuellement distinguées: les lyotropes et les thermotropes.

Les lyotropes sont composés de molécules amphiphiles; leur comportement et leur structure de phase sont contrôlés par la température et la concentration relative des constituants non miscibles. Actuellement il n'y a pas eu de développement d'applications pratiques de ces phases aux dispositifs électrooptiques.

Les **thermotropes** sont des matériaux purs ou des mélanges moléculaires, dont les molécules ne sont pas nécessairement amphiphiles, et dont le comportement est contrôlé par la température. C'est uniquement cette classe des thermotropes, et parmi eux uniquement les molécules de faible poids moléculaire, que nous considérerons ici. On pourra trouver ailleurs [1] des références concernant les molécules de poids moléculaire plus élevé (polymères cristaux liquides).

La plupart des thermotropes de faible poids moléculaire ont des molécules allongées en forme de bâtonnet comportant un corps mésogène (aromatique ou alicyclique) et des groupes terminaux attachés à l'une ou l'autre ou aux deux extrémités.

Deux grandes classes de structures sont utilisées pour décrire le polymorphisme des cristaux liquides (CL): les **nématiques** et les **smectiques** (Fig.1).

Dans les **nématiques**, les molécules sont distribuées au hasard mais leur axe d'élongation pointe localement approximativement dans une même direction appelée le directeur  $n$ . Lorsque des conditions aux limites appropriées et suffisamment fortes sont imposées, cette direction est la même sur de longues distances en comparaison des dimensions moléculaires. La structure la plus largement utilisée actuellement est le nématique en hélice ("twisted nematic" T.N.): les molécules sont ancrées avec une faible inclinaison sur chaque face de la cellule à CL dans des directions qui sont respectivement perpendiculaires l'une à l'autre; ceci conduit, pour des matériaux et des épaisseurs appropriés, à un quart de pas d'une structure hélicoïdale qui agit en guide d'onde pour la lumière polarisée, pour des longueurs d'onde qui satisfont la condition de Mauguin. On trouvera en Annexe I les équations de couplage avec le champ électrique.

Les temps de commutation typiques pour de faibles tensions appliquées sont de quelques dizaines de millisecondes pour 2 à 20 volts sur des cellules de 5 à 50  $\mu\text{m}$  d'épaisseur. Il n'y a pas d'effet mémoire intrinsèque mais l'état commuté peut

être maintenu localement sur les pixels par des moyens extérieurs, par exemple des transistors en couche mince ("thin film transistors" TFT) [2]. Des temps de réponse plus courts ont été publiés pour des matériaux de haute pureté sous fort champ électrique [3]. Si une phase nématique est constituée de molécules chirales, une structure torsadée, appelée cholestérique (N\*), se superpose à la structure nématique, avec un axe d'enroulement perpendiculaire au directeur  $n$ . Le pas de cette torsade est fortement dépendant de la température et de la pression d'où une dépendance selon ces paramètres de l'aspect coloré dû aux réflexions de Bragg sur la structure hélicoïdale périodique.

Dans les **smectiques**, les molécules sont davantage ordonnées: leurs centres de gravité sont dans des plans parallèles les uns aux autres.

Deux sous-classes ont été largement étudiées:

- les **smectiques A** dans lesquels les molécules ont leur grand axe perpendiculaire aux plans;

- les **smectiques C** dans lesquels le grand axe est incliné par rapport aux plans, de telle sorte que les molécules peuvent tourner sur un cône d'axe perpendiculaire aux plans.

La structure smectique est plus proche de celle du cristal que celle des nématiques et conduit dans certains cas à des temps de réponse plus courts (1 à 500  $\mu$ s) et à des effets de mémoire intrinsèques. Si les molécules sont chirales, les symétries de la structure sont modifiées. Dans le cas général, une structure torsadée se superpose à la structure smectique, avec un axe hélicoïdal perpendiculaire aux plans smectiques. Les conséquences de ces structures sont discutées ci-dessous.

#### FERROELECTRICITE DANS LES CRISTAUX LIQUIDES.

La ferroélectricité dans les cristaux liquides a été prévue et démontrée en 1975 par Meyer et al. [4] en se basant sur les arguments suivants: dans les phases smectiques C ordinaires, la symétrie est monoclinique et le groupe de symétrie contient seulement un axe de rotation d'ordre deux parallèle aux couches et normal au grand axe moléculaire, un plan de symétrie perpendiculaire à l'axe de rotation, et un centre d'inversion. Cependant, si les molécules sont chirales (non superposables à leur image dans un miroir), le plan de symétrie et le centre d'inversion sont supprimés. L'axe de rotation d'ordre deux permet l'existence d'un moment dipolaire permanent parallèle à cet axe.

Ceci ouvre la voie à un couplage linéaire entre ce moment dipolaire et un champ électrique appliqué, qui constitue la différence fondamentale par rapport au couplage diélectrique, quadratique en champ, utilisé dans les nématiques, et qui est lié au dipôle induit par le champ électrique lui-même (Annexe I).

Les premières mesures furent faites sur le composé DOBAMBC à des températures comprises entre 70 et 90 °C. Actuellement, les progrès faits dans la synthèse des matériaux ont conduit à des phases smectiques C chirales (SmC\*) à température ambiante.

Comme nous l'avons dit plus haut, l'observation de la ferroélectricité macroscopique nécessite le déroulement de la structure hélicoïdale. Une expression générale donnant le champ critique de déroulement est donnée dans la référence [4]. Des expressions plus détaillées ont été obtenues [5] pour diverses orientations moléculaires.

Le déroulement de la structure hélicoïdale peut être obtenu sur de très grandes surfaces et il est plus aisé pour des matériaux CL de grand pas et pour certaines séquences CL en température. Le couplage diélectrique entre un champ alternatif et le dipôle induit, qui existe aussi, peut aider à dérouler l'hélice. Ceci est même encore plus efficace, comme nous le verrons plus tard lorsque les molécules tendent à s'aligner perpendiculairement au champ alternatif appliqué, c'est à dire lorsqu'elles possèdent une anisotropie diélectrique négative.

La réorientation des molécules sous des champs électriques continus ou alternatifs dépend partiellement de la viscosité de rotation. Ainsi, bien qu'on puisse espérer que les temps de réponse les plus courts soient associés aux polarisations les plus élevées, dans l'état actuel des connaissances [6], les composés qui

ont les plus fortes polarisations ont aussi les plus fortes viscosités de rotation. Actuellement, cette difficulté est contournée par la préparation de mélanges dopés dans lesquels des molécules de forte polarisation sont dissoutes dans des solvants de faible viscosité. Ceci montre l'importance cruciale du génie chimique pour les cristaux liquides ferroélectriques.

### STRUCTURE MOLECULAIRE DES CRISTAUX LIQUIDES FERROELECTRIQUES

Depuis 1976, plusieurs centaines de molécules de SmC\* ont été synthétisées. La structure générale de ces composés est reproduite en Annexe II, ainsi que quelques exemples de molécules qui donnent de fortes polarisations et des temps de réponse très courts. La structure générale est composée de deux ou trois cycles carbonés et de chaînes terminales portant un ou plusieurs carbones asymétriques.

Des travaux récents [36] ont jeté les bases d'un modèle pour l'**origine moléculaire** de la polarisation des CL ferroélectriques. Les auteurs montrent en particulier l'importance des configurations multiples que peuvent prendre les groupes terminaux, très flexibles, par rapport au cœur plus rigide de la molécule. Ces groupes sont beaucoup plus désordonnés ("fondus") que le cœur et donc occupent beaucoup plus de volume que lui. Ceci conduit, pour rendre l'énergie minimum, à une configuration des SmC\* dans laquelle les groupes terminaux sont moins inclinés par rapport aux couches que les cœurs des molécules. Des études par rayons X à haute résolution [37] sur un phényle benzoate apportent une confirmation expérimentale de ces hypothèses.

Nous reproduisons en Annexe III quelques figures extraites de cette référence, que nous avons utilisées dans l'exposé oral.

### BISTABILITE: STABILISATION EN SURFACE ET EN CHAMP ALTERNATIF

Nous avons vu plus haut qu'il est nécessaire de dérouler la structure hélicoïdale pour obtenir une polarisation macroscopique. Il faut donc **maintenir ce déroulement** de l'hélice pour rendre visible l'**effet électrooptique**. L'application d'un champ électrique est couramment utilisée pour dérouler l'hélice, mais lorsque le pas de celle-ci est supérieur à l'épaisseur de la cellule, un nettoyage approprié et un traitement des surfaces de confinement conduisent aussi à ce déroulement. Cependant, ce déroulement n'est maintenu que pour les faibles épaisseurs de cellule (1 à 2  $\mu\text{m}$ ); on obtient alors la **stabilisation de surface** (SS-FLC: surface stabilized ferroelectric liquid crystal). Lorsque les épaisseurs sont supérieures ou égales à 3 ou 4  $\mu\text{m}$ , l'orientation des molécules n'est pas maintenue quand le champ d'adressage est supprimé, ce qui produit des domaines d'orientations diverses.

En 1980, Clark et Lagerwall ont découvert et breveté que, pour des **épaisseurs de cellules inférieures à 2  $\mu\text{m}$**  et une géométrie moléculaire telle que les couches smectiques soient perpendiculaires aux surfaces de confinement ("book shelf geometry"), on obtient la bistabilité [17]. Dans ce cas, les molécules restent dans la position où les a amenées la force de couplage linéaire avec le champ électrique. Avec des conditions aux limites appropriées sur les surfaces de confinement, on peut avoir des molécules quasi-parallèles à ces surfaces dans l'un ou l'autre des états d'orientation de la polarisation ("up" ou "down"). On trouvera une représentation schématique sur la figure 2.

Un autre moyen d'obtenir la bistabilité repose sur le **couplage quadratique** entre le champ électrique appliqué E et le dipôle induit, qui produit un couple de rotation proportionnel à l'anisotropie diélectrique. Lorsque cette anisotropie est négative, le champ appliqué tend à orienter les molécules perpendiculairement à la direction du champ électrique E, quelle que soit sa polarité, puisque l'interaction est quadratique. Ceci a été breveté et publié par Le Pesant et al. en 1984 [18] et constitue une mémoire entretenue qui permet, d'une part d'améliorer la qualité d'orientation et de mémoire dans les cellules de faible épaisseur, et d'autre part d'utiliser dans certains cas des cellules de plus forte épais-

seur (4 à 8  $\mu\text{m}$  typiquement). Ceci constitue la **stabilisation en champ alternatif** (ACS FLC: AC stabilized ferroelectric liquid crystal).

Actuellement, les deux effets sont utilisés conjointement pour obtenir une bonne bistabilité et des taux de multiplexage élevés, et pour rendre minimum les interactions entre pixels.

### TECHNOLOGIE DES CELLULES

L'ancrage et l'orientation des molécules de cristal liquide nématique sur de grandes surfaces est de nos jours bien maîtrisé. Pour les applications commerciales, on utilise des polymères frottés (par exemple des polyimides) comme couche d'alignement. La phase smectique chirale ferroélectrique est plus difficile à orienter parce qu'elle est plus visqueuse et qu'il faut contrôler à la fois l'orientation des couches et celle du directeur moléculaire.

Certains auteurs font état de l'utilisation de polyimide frotté pour la stabilisation en alternatif [18,19] mais d'autres polymères ont été essayés depuis et des résultats expérimentaux d'essais systématiques sur différentes familles de cristaux liquides ont été publiés [20]. A Thomson-CSF, les meilleurs résultats ont été obtenus avec des frottements parallèles ou anti-parallèles des substrats traités soit avec du polyvinyl alcool (épaisseur 100 nm) soit avec du Nylon 6/6 (épaisseur 30nm). Les défauts en "zig-zag" ont été fortement réduits et même éliminés pour certains des composés. Cependant, un travail important reste à faire sur les matériaux cristaux liquides et l'ancrage car actuellement, les échantillons les mieux orientés ne sont pas nécessairement ceux qui présentent la meilleure bistabilité.

Le choix des cales d'épaisseur est crucial pour le contrôle de l'uniformité de l'épaisseur des cellules. Plusieurs laboratoires ont utilisé des fibres de verre attaquées à l'acide fluorhydrique et calibrées au diamètre désiré. Ceci conduit à des difficultés technologiques quand l'épaisseur demandée est seulement de quelques micromètres. Des sphères de polystyrène peuvent aussi être utilisées, en particulier en dispersion dans la couche d'ancrage et d'orientation, avant son dépôt, mais il faut alors empêcher l'aggrégation des sphères pour éviter des surépaisseurs locales. Des cales d'épaisseur formées par un procédé de masquage ont l'avantage de permettre un positionnement précis de ces cales d'épaisseur entre les pixels, en dehors des zones utiles du dispositif. Des réalisations selon ce type de technologie ont été obtenues d'une part à l'Université de Boulder (Colorado) avec des cales d'épaisseur en monoxyde de silicium [21] et d'autre part à CEA-D.LETI [22] et à Thomson-CSF/LCR avec des cales en résine photoresist.

Le remplissage des cellules est une autre opération critique pour la fabrication des dispositifs à  $\text{SmC}^*$ , à cause de la viscosité qui oblige à chauffer lors du remplissage et donc à tenir compte de l'existence de séquences de phases entre le  $\text{SmC}^*$  et le liquide isotrope. Actuellement, les meilleurs résultats sont obtenus en remplissant les cellules dans la phase liquide isotrope et en les laissant refroidir lentement. Un traitement thermique final sous champ électrique alternatif permet l'élimination de la plupart des défauts en zig-zag. Les structures et les défauts dans les smectiques chiraux ont été étudiés en particulier par M. Brunet [23] et divers auteurs cités dans cette référence. Avec les matériaux actuellement disponibles, une séquence comportant les phases cholestérique et smectique A ( $\text{I} - \text{N}^* - \text{SmA} - \text{SmC}^*$ ) semble être la plus appropriée. Une étude par diffusion des rayons X à haute résolution de la structure locale en "chevron" des couches  $\text{SmC}^*$  stabilisées en surface a été faite par Riecker et al. [24] en fonction de la température; elle montre l'influence de la présence initiale de défauts dans la phase  $\text{SmA}$ .

### DISPOSITIFS DE VISUALISATION

De nombreux travaux de recherche portent actuellement sur la fabrication de dispositifs de visualisation à cristaux liquides ferroélectriques, qui ont l'avantage de la rapidité (quelques dizaines de microsecondes par ligne), de la mémoire intrinsèque (SSFLC) ou entretenue (ACS FLC) et d'un très large angle de vue. Les premiers prototypes de grandes dimensions ont été présentés avec des images fixes dès 1985 par Seiko Instruments au Japan Electronic Show à Osaka. Des progrès ont été faits depuis pour obtenir des images vidéo et bientôt des images couleur avec teintes de gris [22-26]. Un écran en noir et blanc de 6 pouces de diagonale avec 9 teintes de gris a été présenté par CEA-D.LETI à IDRC 1988 à San Diego et Canon met au point un écran de format A4 compatible avec la haute qualité bureautique (SID 1989).

### OBTURATEURS

Les propriétés spécifiques des cristaux liquides ferroélectriques, rapidité et bistabilité, les rendent très attractifs pour la réalisation d'**obturateurs optiques** compacts, de forte densité et potentiellement de faible coût. Nous donnerons ici comme exemple d'application celui des barrettes d'obturateurs pour têtes d'impression.

La demande actuelle pour les télécopieurs, les traitements de texte et les imprimantes pour ordinateurs portables a fait naître le besoin d'imprimantes sans impact, compactes, légères et de faible coût. C'est pourquoi des imprimantes photo-électrographiques comportant des barrettes d'obturateurs à cristaux liquides (LCLSA: liquid crystal light shutter arrays) sont à l'étude depuis maintenant 4 ans.

Umeda et al. chez Hitachi [27,28] ont démontré la faisabilité d'une ligne d'obturateurs multiplexés à cristaux liquides ferroélectriques utilisant une méthode de stabilisation en champ alternatif. La structure de leur tête d'impression est représentée sur la figure 3. La séquence de commutation et de stabilisation (Fig.4) utilise des impulsions de 20 V Cont., séparées par des séquences en alternatif (tension VH) à 45 V et 25 kHz, superposées à une rampe continue, ce qui a pour effet de réduire notablement le changement de transmission lumineuse (Fig. 5): quand VS est appliqué seule, la variation est grande, mais quand on applique VS+VH, la variation est de moins de 20% de la transmission initiale. L'épaisseur de cristal liquide est de  $4,4 + 0,4 \mu\text{m}$  et la ligne d'obturateurs est au pas de 10 points/mm; le temps d'impression par ligne de 1,25 ms permet l'impression de 12 pages par minute.

Un travail un peu semblable a été fait à NEC par Naemura et al. [29].

### MODULATEURS OPTIQUES

Les propriétés de commutation des cristaux liquides ferroélectriques permettent la fabrication de **modulateurs optiques spatiaux** rapides et à haut contraste pour des applications telles que le traitement optique du signal (par exemple le traitement des images, qui demande de grandes vitesses de données) ou le calcul optique (par exemple portes logiques, crossbars optiques, masques de filtrage spatial). Un réseau linéaire de valves optiques a été réalisé dans une version préliminaire dès 1983 par Clark et al. et se trouve décrit, ainsi que les améliorations ultérieures dans la référence [21]. La version améliorée comportait 256 bandes, chacune de largeur  $90 \mu\text{m}$  espacées de  $10 \mu\text{m}$ ; l'épaisseur de cellule était de  $1 \mu\text{m}$  grâce à des cales d'épaisseur en SiO de  $30 \times 30 \mu\text{m}$ . La commutation entre les deux états stables (stabilisés par effet de surface) était obtenue par de brèves impulsions de durée 10 et 100  $\mu\text{s}$ . Des temps de réponse inférieurs à 1  $\mu\text{s}$  dans la phase SmC\* ont été annoncés et certaines petites zones des cellules de test ont même pu être commutées avec des impulsions d'environ 100 ns sous 40 V. Plusieurs matériaux cristaux liquides ont été utilisés, comme par exemple le MBRA et le HOBACPC, qui présentent une phase SmC\* dans la gamme 40-65 °C.

Plus tard, Armitage et al.[30] ont comparé les nématiques rapides et les ferroélectriques pour les modulateurs spatiaux de lumière (SLM:spatial light modulator). Ils ont proposé d'utiliser des ferroélectriques stabilisés par les surfaces (SSFLC) pour les modulateurs spatiaux dans les applications de traitement optique. Un banc de test de modulateur spatial a été construit, qui comporte un SSFLC associé à une plaque de BSO (Bismuth Silicon Oxide), insérés entre des substrats en verre (Fig.6 et 7). Pour des échantillons à alignement faible, ces auteurs ont pu observer non seulement la commutation à cadence vidéo, mais aussi le stockage d'informations pendant des durées significatives (plusieurs heures).

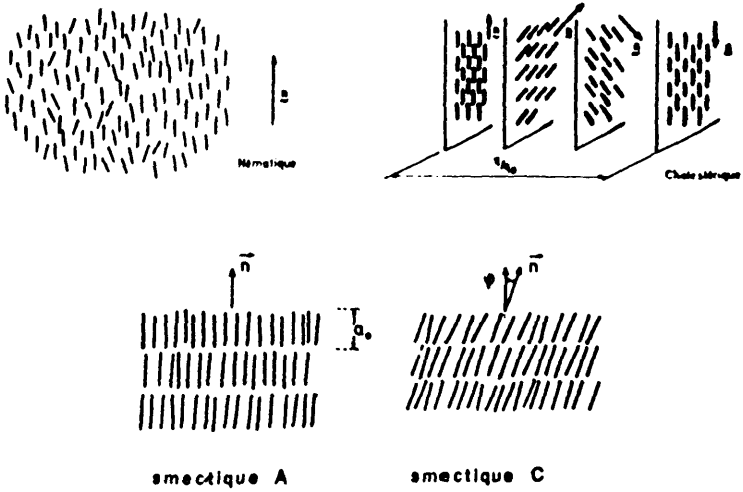
Nous avons signalé ci-dessus que la synthèse chimique appropriée et une gamme de température convenable permettent de contrôler l'angle d'inclinaison des molécules en phase  $SmC^*$ , par rapport à la normale aux plans smectiques. Lorsque le cristal liquide a été synthétisé pour être essentiellement optiquement uniaxe en phase  $SmC^*$  et avoir une valeur de  $22,5^\circ$  de l'angle d'inclinaison sur une plage de température suffisamment large, alors, l'axe optique, lié directement à la direction moléculaire, peut être tourné électriquement de  $45^\circ$ ; si de plus, l'épaisseur de la cellule est convenablement choisie, on peut réaliser une lame demi-onde programmable électriquement. Ceci permet donc, par sélection électrique de l'état du ferroélectrique, soit de laisser inchangée une onde en incidence normale linéairement polarisée, soit de faire tourner sa polarisation de  $90^\circ$ .

L'utilisation de telles propriétés permet la réalisation sous forme matricielle de **réseaux de portes optiques** de faible pas. A Thomson-CSF, nous avons réalisé des cellules de test pour des dispositifs de  $32 \times 32$  au pas de  $250 \mu m$  et pour des matrices de  $256 \times 256$  au pas de  $50 \mu m$ . La commutation optique est obtenue dès l'application d'une tension inférieure à  $+5$  ou  $-5$  volts; le temps de commutation dépend de la tension appliquée; par exemple, sous une tension de  $+5$  ou  $-5$  V à  $2$  kHz, un temps de réponse de  $35 \mu s$  a été observé à température ambiante.

De tels dispositifs peuvent être utilisés pour réaliser des réseaux de portes optiques pour le **calcul optique** et pour le traitement d'images [31-35] comme nous l'avons signalé ci-dessus. Dans l'exemple décrit dans la référence [31], une matrice  $32 \times 32$  a été réalisée, qui comporte des pixels de  $17 \mu m$  de côté espacés de  $5 \mu m$ . Le contraste maximum mesuré à  $100$  Hz était de  $1500:1$  sur un point unique et de  $125:1$  sur le réseau matriciel. Des temps de commutation de  $12 \mu s$  à température ambiante et de  $500$  ns à plus haute température ont été annoncés dans cet article. Des portes logiques Booléennes de type XOR et XNOR utilisant les deux états de polarisation lumineuse ont été imaginées, avec l'avantage d'éviter la dissipation de puissance lumineuse et donc de permettre de placer de nombreuses portes optiques en cascade.

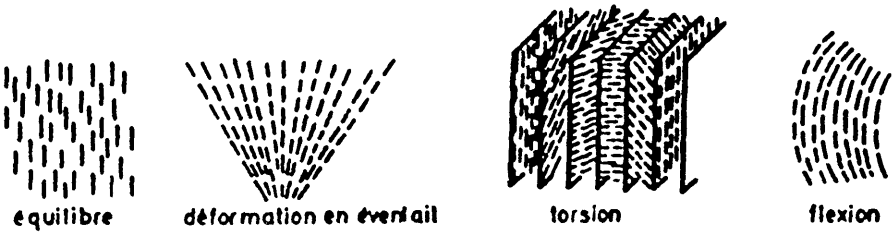
### CONCLUSIONS ET TENDANCES

Les cristaux liquides chiraux ferroélectriques ont, comme les autres cristaux liquides, l'intérêt de présenter de fortes valeurs de l'anisotropie de l'indice de réfraction et de pouvoir être commutés sous de faibles tensions de commande. Ils ont l'avantage supplémentaire de permettre un couplage linéaire en champ électrique, une commutation moléculaire très rapide (par rapport aux autres cristaux liquides), la bistabilité et un large angle de vue qui les ont déjà rendus très attractifs pour les applications en visualisation. L'élaboration de nouvelles molécules et la préparation de mélanges sont des étapes fondamentales vers des matériaux de basse viscosité, de faible temps de réponse et de grande stabilité à température ambiante. Les futures applications comporteront peut être des obturateurs pour des têtes d'impression compactes et de faible coût et des modulateurs optiques pour le traitement de signal et le calcul optique. Des dispositifs encore plus rapides (temps de réponse inférieur à  $500$  ns) avec des pixels plus petits (taille inférieurs à  $5 \mu m$ ) et une meilleure qualité optique deviendront vraisemblablement très utiles pour les processeurs optiques parallèles à haut débit.



**Arrangement des molécules dans les phases:**

**Nématique; Cholestérique; Smectiques A et C**



**Les 3 modes de déformation**

**Divergence (éventail)**

**Torsion**

**Flexion**

Figure 1: Symétries des cristaux liquides



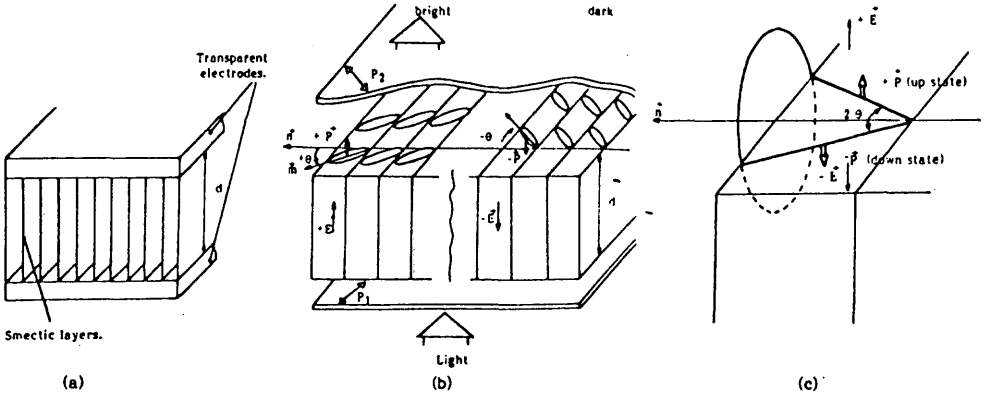


Figure 2  
Surface Stabilized Ferroelectric Liquid Crystal Structure (SSFLC)

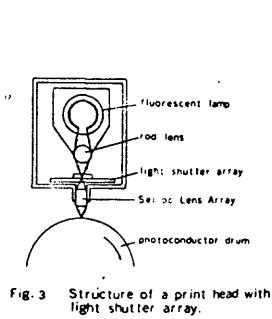


Fig. 3 Structure of a print head with light shutter array.

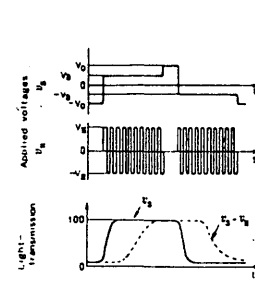


Fig. 4 AC field-stabilization method

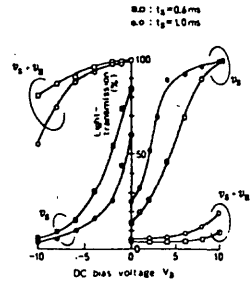
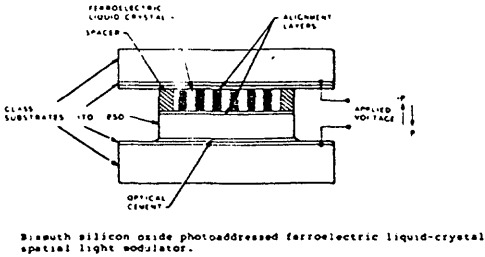


Fig. 5 Light transmission characteristics

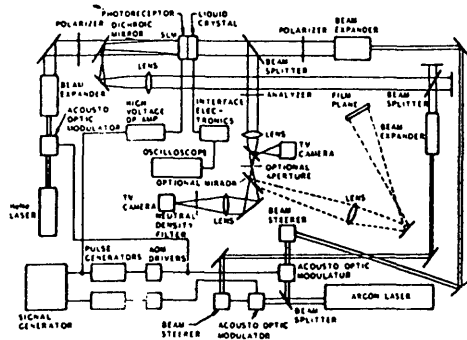
From Umeda et al. [27-28]



Bismuth silicate photoaddressed ferroelectric liquid-crystal special light modulator.

D. Armitage et al. 36th SPIE San Diego (1991)

Figure 6



Complete spatial light modulator test bed.

D. Armitage et al. 36th SPIE San Diego (1991)

Figure 7

## ANNEXE I

## C. L. NEMATIQUES

COUPLAGE DU DIPOLE INDUIT AVEC  $\vec{E}$ 

$$\Omega_E = \Delta \epsilon E^2 \sin \varphi \cos \varphi'$$

$\Omega_E$  = COUPLE ELECTRIQUE

$\Delta \epsilon = \epsilon_{\parallel} - \epsilon_{\perp}$  = ANISOTROPIE DE PERMITTIVITE

$\vec{E}$  = CHAMP ELECTRIQUE APPLIQUE

$\varphi$  = ORIENTATION DU DIRECTEUR  $\hat{N}$  PAR RAPPORT A  $\vec{E}$

FORCES VISCOELASTIQUES

$$\Omega_V = K \frac{d^2 \hat{N}}{dz^2} + \eta \frac{d \hat{N}}{dt}$$

K = MODULE ELASTIQUE

$\hat{N}$  = DIRECTEUR POUR L'ORIENTATION MOLECULAIRE LOCALE

Z = COORDONNEE SPATIALE

$\eta$  = VISCOSITE

© THOMSON-CSF  
LABORATOIRES CENTRAUX DE RECHERCHES

© THOMSON-CSF  
LABORATOIRES CENTRAUX DE RECHERCHES

## C. L. FERROELECTRIQUES

COUPLAGE AVEC LA POLARISATION FERROELECTRIQUE

$$\Omega_P = PE \sin \psi$$

$\Omega_P$  : COUPLE

$\vec{P}$  : POLARISATION FERROELECTRIQUE

$\vec{E}$  : CHAMP ELECTRIQUE APPLIQUEE

$\psi$  : ANGLE ENTRE  $\vec{P}$  ET  $\vec{E}$

COUPLAGE AU DIPOLE INDUIT

$$\Omega_E = \Delta \epsilon E^2 \sin \zeta \cos \zeta$$

$\Omega_E$  : COUPLE

$\Delta \epsilon$  : ANISOTROPIE DE PERMITTIVITE

$\vec{E}$  : CHAMP ELECTRIQUE

$\zeta$  : ANGLE ENTRE  $\hat{N}$  ET  $\vec{E}$

## C. L. NEMATIQUES

TEMPS DE REPONSE (ORIENTATION PARALLELE)

$$\text{TEMPS DE MONTEE } \tau_R = \eta L^2 / (\Delta \epsilon V^2 - K \pi^2)$$

$$\text{TEMPS DE DESCENTE } \tau_D = \eta L^2 / K \pi^2$$

L = EPAISSEUR DE CELLULE

V = TENSION APPLIQUEE

## C. L. FERROELECTRIQUES

INTENSITE TRANSMISE

$$I = I_0 \sin^2 4\theta \sin^2 \frac{\pi \Delta n L}{\lambda}$$

$\theta$  INCLINAISON MOLECULAIRE

$\Delta n$  BIREFRINGENCE

L EPAISSEUR DE CELLULE

$\lambda$  LONGUEUR D'ONDE

$$I = I_{\max} \text{ FOR } \theta = 22,5 \text{ deg.}$$

TEMPS DE REPONSE

$$\tau = \frac{\eta}{PE}$$

$$\text{e.x. ZLI 4003 } \tau = 35 \mu\text{s}$$

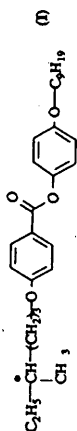
$$\begin{cases} V = 40 \text{ V} \\ T = 20^\circ \text{C} \\ d = 2 \pm 0,1 \mu\text{m} \end{cases}$$

CONTRASTE

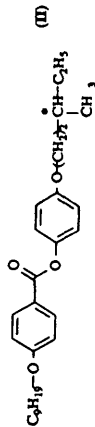
$$C = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad \begin{array}{l} C \text{ CELLULE VIDE} = 0.997 \\ C \text{ CELL. + ZLI 3654} = 0.965 \end{array}$$

ANNEXE II

© THOMSON-CSF  
Laboratoire Central de Recherches

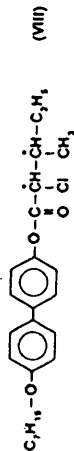


C 32 SC 45,4 N° 57,2 L  
4-n-Nonyloxyphenyl 4'-(4'-methyloxy) benzoate



C 41 (S) 4 SC 49 S, 59 N° 62 L  
4-(3'-methylphenyl) 4'-n-nonyloxy benzoate

Until now, the highest spontaneous polarization ever found has been obtained with compound (VIII) (Sakurai et al., 1986 ; Bahr and Hesppte, 1986)

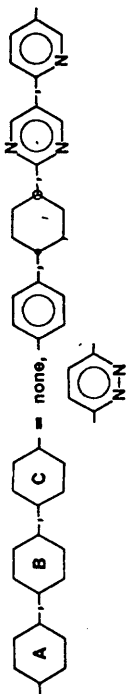


$P_S = 280 \text{ nCcm}^{-2}$  at  $T = 43.5^\circ\text{C}$ .

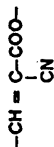
© THOMSON-CSF  
Laboratoire Central de Recherches



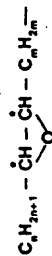
where



Z, Z' = none, -COO-, -O-CH2-, -CH2-CH2-, -CH=N-, -CH=CH-  
 Y, Y' = none, -O-, -COO-, -COS-, -CH=CH-COO-, -CH=C(CO)-,  
 Cl



$R_1, R_2 = C_nH_{2n+1}, C_nH_{2n+1}-\overset{\text{X}}{\underset{\text{X}}{\text{C}}}-C_mH_{2m}$ ;



with X = CH3, Cl, Br, CN, CF3.

© THOMSON-CSF  
Laboratoire Central de Recherches

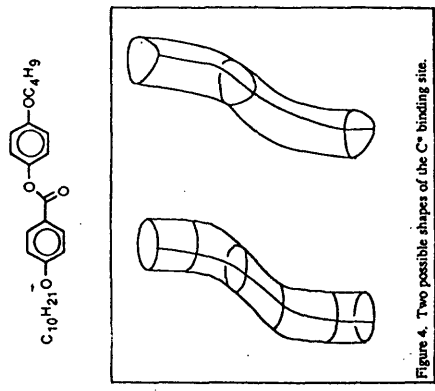


Figure 4. Two possible shapes of the C\* binding site.

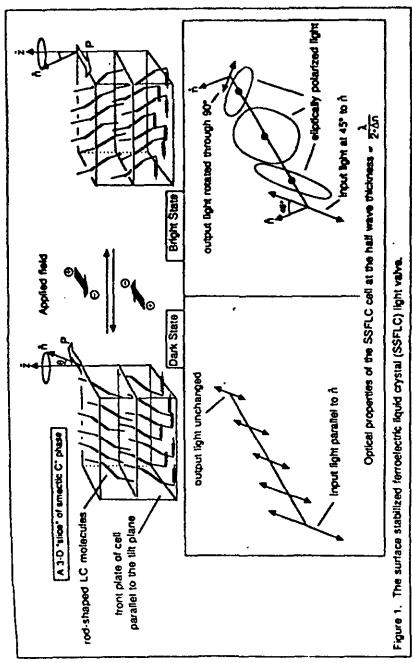


Figure 1. The surface stabilized ferroelectric liquid crystal (SSFLC) light valve.

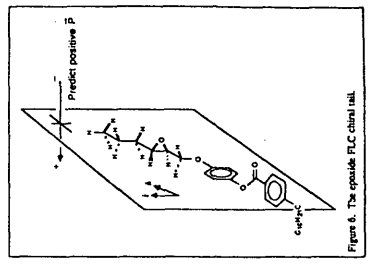


Figure 6. The epoxide FLC chiral unit.

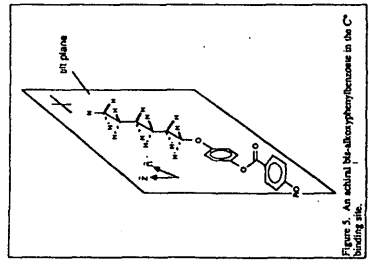


Figure 5. An actual 18-cyanophenylfluorene in the C\* binding site.

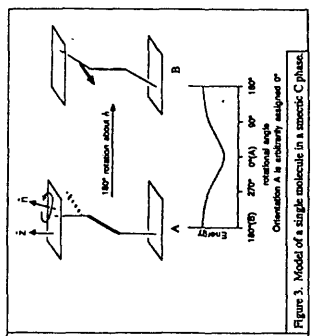


Figure 3. Model of a single molecule in a smectic C phase.

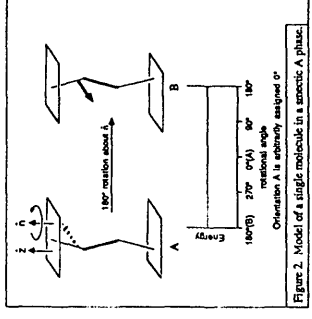


Figure 2. Model of a single molecule in a smectic A phase.

ANNEXE III

THOMSON-CSF  
LUMINESCENCE OPTICS IN LIQUID CRYSTALS

THOMSON-CSF  
LUMINESCENCE OPTICS IN LIQUID CRYSTALS

THOMSON-CSF

THOMSON-CSF  
LUMINESCENCE OPTICS IN LIQUID CRYSTALS

## REFERENCES

- [1] P. Le Barny and J.C. Dubois, *Side Chain. Liq. Cryst. Polym.* C.B. Mc Ardle Edt. Chap. V to be published.
- [2] J. Magarino - *Appl. Phys. A*, **41**, 297 (1986)  
J.P. Le Pesant - *Opto 88 17-19 May 1988 Paris ESI Publications.*
- [3] D.J. Grant, B.K. Jones and M.G. Clark, *Int. Disp. Res. Conf. "Eurodisplay 87" Conf. Proceed.* p.67 (1987).
- [4] R.B. Meyer, L. Liebert, L. Strzelecki and P. Keller *J. Phys. Paris Lett.* **36**, L 69 (1975).
- [5] P. Martinot-Lagarde, R. Duke and G. Durand - *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* **75**, 249 (1981).
- [6] T. Geelhar 1st International Symposium on Ferroelectric Liquid Crystals Arcachon (1987).
- [7] C. Destrade, J. Malthete, Nguyen Huu Tinh, *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, **127**, 273 (1985).
- [8] J. Goodby, T. Leslie, *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, **110**, 175 (1984).
- [9] B. Otterholm, M. Nilsson, S. Lagerwall, K. Skarp, *Liq. Cryst.*, **2** (6), 757 (1987).
- [10] M. Bradshaw, J. Constant, E. Raynes, *The British Liquid Crystal Society Annual conference, Manchester* (1986).
- [11] B. Otterholm, C. Alstermark, K. Flatischler, A. Damgren, S. Lagerwall, K. Skarp, *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* **146**, 189 (1987).
- [12] J. Patel, J. Goodby, *Optical Engineering*, **26**, (5) 373 (1987).
- [13] N. Clark, S. Lagerwall, *Ferroelectrics* **59**, 25 (1984).
- [14] T. Sakurai, N. Mikami, R. Higuchi, M. Honma, M. Ozadi, K. Yoshino, *J. Chem. Soc. Chem. Commun*, 978 (1986).
- [15] C. Bahr, G. Heppke, *Mol. Cryst. Liq. Cryst. Letters*, **4** (2), 31 (1986).
- [16] I. Sage, J. Jenner, M. Chambers, M. Bradshaw, V. Brimmell, J. Constant, J. Hugues, E. Raynes, A. Samra, G. Gray, D. Lacey, K. Toyne, L. Chan, I. Shenouda, A. Jackson 1<sup>st</sup> International Symposium on Ferroelectric Liquid Crystals Arcachon (1987).
- [17] N.A. Clark, S.T. Lagerwall. *Appl. Phys. Lett.* **36**, 899, 1980.  
S.T. Lagerwall, B. Otterholm, K. Sharp. *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* **152** (p<sup>t</sup> B), 50.-87, 1987.
- [18] J.P. Le Pesant, J.N. Perbet, B. Mourey, M. Hareng, G. Decobert and J.C. Dubois. 10th Inter. Liq. Cryst. Conf., York, G.B., 15-21 July 1984. Published in *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* **129**, 61 (1985).
- [19] J.S. Patel, T.M. Leslie, J.W. Goodby, *Ferroelectrics* **59**, 137 (1984).
- [20] C. Bowry, A. Mosley, B.M. Nicholas, F. Le Texier, J.P. Boyer, J.P. Le Pesant, J.F. Clerc *J. Dijon and C. Ebel*, 1 st Int. Symp. Ferro. Liq. Cryst., Arcachon, F. (1987). to be published in *Ferroelectrics*.
- [21] N.A. Clark, S.T. Lagerwall and J. Wahl, *Proceed. SID 2612*, 133 (1985).
- [22] J. Dijon. P. Maltese, C. Ebel, *Proceed. Eurodisplay 1987*, p. 40 (1987).
- [23] M. Brunet, N. Isaert, 1 st Int. Symp. Ferro. Liq. Cryst., Arcachon, F (1987) to be published in *Ferroelectrics*.
- [24] W.A. Crossland, M. Bone, F.W. Ross - *Proceed. Eurodisplay 1987* p. 29 (1987).
- [25] S. Matsumoto, A. Mura-yama, H. Hatoh, Y. Kinoshita, H. Hirai, M. Ishikawa, S. Kamagami, *SID 88 Digest*, 41 (1988).
- [26] J. Dijon, C. Ebel, C. Vauchier, F. Baume J.F. Clerc, M. Estor, T. Leroux, P. Maltese, L. Mulatier, *SID 88 Digest*, 246 (1988).
- [27] T. Umeda, Y. Hori and A. Mukoh, *SID 85 Digest*, 373 (1985).
- [33] J.S. Patel *Opt. Eng.* **26**, 129 (1987).
- [34] L.A. Pagano-Stauffer, K.M. Johnson, N. Clark and M. Handschy, *SPIE 684*, *Liq. Cryst. Sp. Light Modul. Mater.*, **88** (1986).
- [35] N.A. Handschy, K.M. Johnson, W.T. Cathey and L.A. Pagano-Stauffer, *Opt. Lett.* **12**, 611 (1987).

- [28] T. Umeda, T. Nagata, A. Mukoh and Y. Hori, SID 87 Digest, 352 (1987).
- [29] S. Naemura, H. Ichinose, Y. Kato, H. Ueda, A. Kogo, K. Ohsawa, S. Ishizaki, H. Kitayama and M. Yukino, SID 87 Digest, 356 (1987).
- [30] D. Armitage, J.I. Thackara, N. Clark and M.A. Handschy, 30 th SPIE, San Diego, USA (1986) see also : Molec. Cryst. Liq. Cryst. 144, 309 (1987).
- [31] K.M. Johnson, M.A. Handschy and L.A. Pagano-Stauffer, Opt. Engin. 26, 385 (1987).
- [32] G. Moddel, K.M. Johnson and M.A. Handschy, SPIE 754, Opt. Dig. Patt. Recog., 207 (1987).
- [36] D.M. Walba and N.A. Clark, SPIE Vol. 825 Spat. Light Modul. Applic. II, 81 (1987).
- [37] T.P. Rieker et al., Phys. Rev. Lett. Vol. 59, 2658 (1987).