



HAL
open science

Les cristaux liquides et leurs applications aux technologies de l'information et de la communication

Laurent Dupont

► **To cite this version:**

Laurent Dupont. Les cristaux liquides et leurs applications aux technologies de l'information et de la communication. Optique / photonique. Université de Bretagne Sud, 2003. tel-02880843

HAL Id: tel-02880843

<https://imt-atlantique.hal.science/tel-02880843v1>

Submitted on 25 Aug 2020

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

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

Les cristaux liquides et leurs applications aux technologies de l'information et de la communication

Synthèse de l'activité scientifique
Dossier présenté pour l'Habilitation à Diriger les Recherches
devant l'Université de Bretagne Sud

Soutenance: le 27 juin 2003 à l'ENST Bretagne

MM.	S. T. Lagerwall	Rapporteur
	Ph. Martinot-Lagarde	Rapporteur
	P. Pellat-Finet	Rapporteur
	M. Monerie	Examineur
	J.L. de Bougrenet de la Tocnaye	Examineur

Laurent Dupont
Département d'optique
ENST Bretagne

Formation et Diplômes :

- 1987-1990 : Thèse au Centre de Recherche Paul Pascal (33-Pessac). Obtention du titre de Docteur, spécialité Chimie Physique, Université de Bordeaux I.
Titre de la thèse : « Etude expérimentale de la transition de phase smectique A-smectique C* Ferroélectrique par couplage électroclinique ». (Soutenue le 30 Octobre 1990).
- 1983-1986 : Etudes d'ingénieur. Diplôme d'ingénieur de l'Ecole Nationale Supérieure de Chimie et Physique de Bordeaux.

Domaines de compétences :

- Matériaux : cristaux liquides /effets électro-optiques.
- Composants passifs pour les télécommunications optiques.
- Technologie cristal liquide.
- Optique polarimétrique et propagation dans les milieux biréfringents.
- Optique espace libre et guidée.

Publications et brevets

- 19 publications internationales avec comité de lecture.
- 7 articles de congrès.
- 8 brevets + 3 en cours de dépôt.

Encadrement par la recherche

- 4 Thèses en responsabilité directe
- 3 Thèses co-encadrées
- 3 Stages de DEA
- Encadrement de stages d'ingénieur

Activités d'enseignement

- Cours sur les composants passifs et actifs (3^{ème} année / option RCO, ENST-Bretagne)
- Cours d'optique dans les milieux anisotropes (1^{ère} année, ENST Bretagne)
- Cours sur l'ingénierie des systèmes de transmission optique (2^{ème} année ENST Bretagne)
- Cours sur les systèmes de transmission optique (ISEB 3^{ème} année)
- Cours sur les composants pour les télécommunications optiques (Maîtrise Physique Université de Bretagne Sud)
- Responsable des projets techniques (3^{ème} année / option RCO, ENST Bretagne)
- Responsable des modules « Composants passifs et actifs pour les télécommunications / 3^{ème} année / option RCO, ENST Bretagne)
- Responsable MsC : « Optical Communication Networks »

Sommaire

Les cristaux liquides	page
1) propriétés thermotropes et paramètre d'ordre	12
2) La phase nématique	14
3) Les mésophases smectiques	18
4) Structure confinée du cristal liquide	20
5) Dynamique du couplage ferroélectrique.	21
6) Transition Smectique A*- Smectique C*	23
7) Dynamique de l'effet électroclinique	26
8) Les couches smectiques en structure confinée (structure chevron)	30
9) Les structures composites : polymère / cristaux liquides	34
La technologie cristal liquide	
1) Le process	42
2) Les matériaux	45
3) Electrically Addressed Spatial Light Modulator (EASLM)	47
4) Optically Addressed Spatial Light Modulator (OASLM)	48
Les fonctions pour les télécommunications optiques	
1) Les différentes fonctions en télécommunications optiques	54
2) Les caractéristiques des composants optiques passifs	60
3) Le matériau : cristal liquide	61
4) Les fonctions optiques avec les cristaux liquides	62
Les technologies	
1) Composants à cristaux liquides fibrés avec férule	75
2) Atténuateur optique variable	79
3) Composants avec un mode guidé dans le cristal liquide	82
4) Le contrôleur de polarisation	88

I

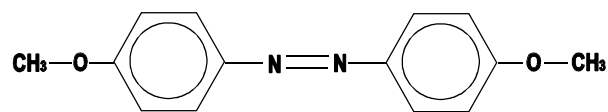
Les cristaux liquides

1) propriétés thermotropes et paramètre d'ordre

En toute généralité, les cristaux liquides possèdent à la fois des propriétés classiquement attribuées aux cristaux (propriétés optiques et propriétés mécaniques tensorielles) et aux fluides (viscosité par exemple). Pour les cristaux liquides dits « thermotropes », la phase cristal liquide apparaît dans une certaine gamme de température. Ces propriétés remarquables sont essentiellement dues à la structure particulière des molécules constitutantes de ces matériaux. Celles-ci se répartissent en deux grandes familles :

Molécules calamitiques
molécules discotiques

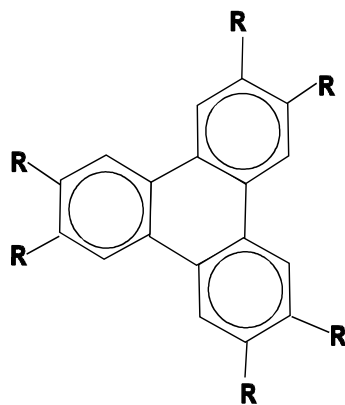
La première famille décrit des molécules ayant une structure allongée :



p-azoxyanisole

Cette famille de molécules est nématogène ou smectogène.

La deuxième famille est constituée de molécules de forme aplatie et possédant une certaine symétrie axiale.

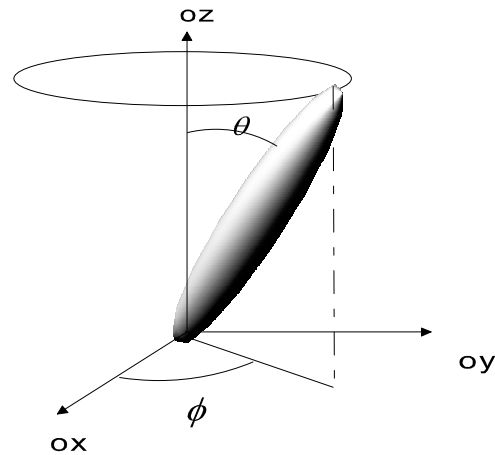


Ces molécules vont s'assembler pour former des phases colonnaires

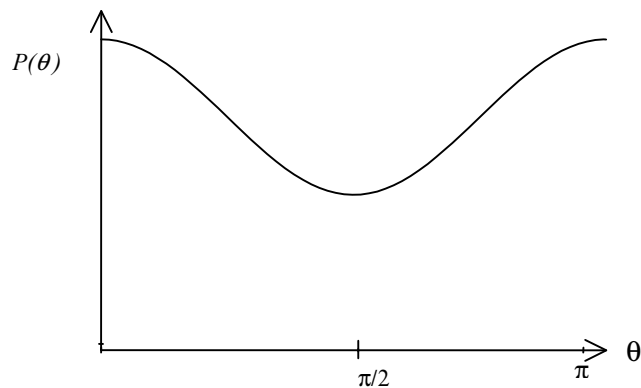
1.1) Le vecteur directeur \mathbf{n}

En modélisant les molécules comme de simples bâtonnets rigides, dont l'orientation peut fluctuer, il est possible de caractériser l'ordre d'orientation. On supposera que l'axe préférentiel d'orientation est oz . Ces bâtonnets sont repérés dans le référentiel du laboratoire par un vecteur unitaire ; pour une molécule α donnée :

$$\begin{aligned} n_x^\alpha &= \sin\theta \cos\phi \\ n_y^\alpha &= \sin\theta \sin\phi \\ n_z^\alpha &= \cos\theta \end{aligned}$$



La distribution statistique $P(\theta)$, décrivant l'orientation des bâtonnets, est symétrique par rapport à $\theta = 0$. Les axes oz et $-oz$ sont équivalents, ce qui exclut la possibilité d'avoir une ferroélectricité longitudinale. Elle est représentée de la façon suivante :



L'ordre d'orientation de ces bâtonnets est donné par le paramètre d'ordre :

$$S(T) = \int P(\theta) \frac{1}{2} (3 \cos^2 \theta - 1) d\Omega = \frac{1}{2} \langle 3 \cos^2 \theta - 1 \rangle$$

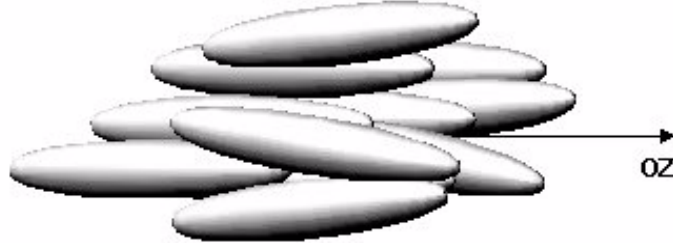
Ce paramètre d'ordre est équivalent à la dépendance angulaire de la composante radiale du champ électrique d'un système quadripolaire : il est compris entre 0 et 1. Il prend une valeur nulle dans la phase isotrope et sa valeur maximale lorsque toutes les molécules sont parfaitement orientées.

L'axe oz est appelé vecteur directeur \mathbf{n} et il donne l'orientation préférentielle des molécules. Le directeur est donc une formulation macroscopique de l'orientation moyenne des molécules.

2) La phase nématique

2.1) Tenseurs en phase nématique

Elle se caractérise par un ordre d'orientation selon une direction privilégiée.



La phase nématique possède la symétrie D_∞ (symétrie uniaxe). L'orientation du directeur étant défini ainsi que le paramètre d'ordre $S(T)$, il est alors possible de définir un paramètre d'ordre tensoriel. Prenons le tenseur d'ordre 2 de la susceptibilité (magnétique ou diélectrique). Ce dernier s'écrit sous sa forme diagonale ;

$$\chi_{ij} = \begin{pmatrix} \chi_\perp & 0 & 0 \\ 0 & \chi_\perp & 0 \\ 0 & 0 & \chi_\parallel \end{pmatrix}$$

Pour le nématique uniaxe, ce tenseur peut se décomposer en parties isotrope et anisotrope :

$$\chi_{ij} = \begin{pmatrix} \chi & 0 & 0 \\ 0 & \chi & 0 \\ 0 & 0 & \chi \end{pmatrix} + \frac{1}{3} \begin{pmatrix} \Delta\chi & 0 & 0 \\ 0 & \Delta\chi & 0 \\ 0 & 0 & -2\Delta\chi \end{pmatrix} = \chi \delta_{ij} + \Delta\chi T_{ij} = \chi \delta_{ij} + Q_{ij}$$

avec : $\chi = \frac{2\chi_\parallel + \chi_\perp}{3}$, $\Delta\chi = \chi_\parallel - \chi_\perp$

Le tenseur Q_{ij} est un paramètre d'ordre tensoriel : il représente la différence entre le tenseur de susceptibilité mesuré en phase nématique et celui de la phase isotrope :

$$Q_{ij} = \chi_{ij} - \frac{1}{3} \text{Tr}(\chi_{ij}) \delta_{ij}$$

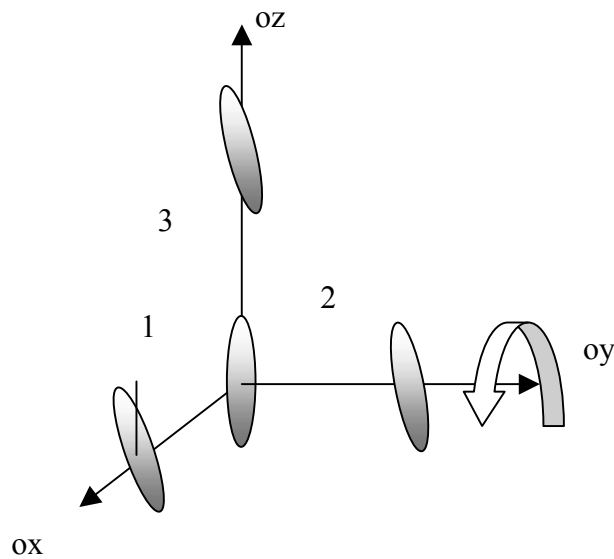
Le vecteur directeur \mathbf{n} est le vecteur propre principal de ce tenseur. D'autre part, $Q_{ij} = 0$ en phase isotrope et, on peut également montrer que :

$$\Delta\chi \propto S(T)$$

2.2) Energie élastique

L'énergie ne peut dépendre de l'orientation du directeur par conséquent, seuls des termes du type : $K_{ijkl} \nabla_i n_j \nabla_k n_l$ interviennent dans l'énergie volumique de déformation. Des considérations de symétrie sur la phase nématique montrent que le tenseur K_{ijkl} ne possède que 3 composantes indépendantes.

Supposons que l'on déforme le milieu par rotation selon une direction : l'axe oy par exemple (il est évident que l'axe ox joue le même rôle alors qu'une rotation d'axe oz laisse le système invariant). En regardant les positions des molécules voisines par rapport à la molécule de référence, on voit qu'il existe 3 déformations différentes possibles.



Déformation du type 1 : déformation éventail (Splay) : $\Rightarrow \nabla \vec{n} \neq 0$

Déformation du type 2 : torsion (Twist) : $\Rightarrow \vec{n} \cdot \nabla \times \vec{n} \neq 0$

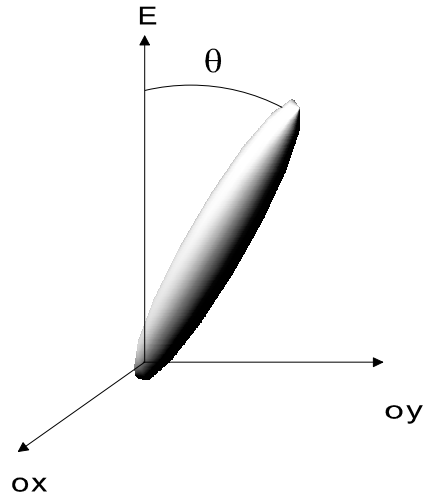
Déformation du type 3 : flexion (Bend) : $\Rightarrow \vec{n} \times \nabla \times \vec{n} \neq 0$

La densité d'énergie élastique par unité de volume s'exprime sous la forme donnée par Oseen (1925) et Franck (1958):

$$F = \frac{1}{2} K_1 (\nabla \vec{n})^2 + \frac{1}{2} K_2 (\vec{n} \cdot \nabla \times \vec{n})^2 + \frac{1}{2} K_3 (\vec{n} \times \nabla \times \vec{n})^2$$

2.3) Couplage diélectrique

Le directeur est incliné d'un angle θ par rapport au champ électrique.



Le vecteur déplacement électrique s'écrit : $\vec{D}_i = \epsilon_{ij} \vec{E}_j$. Cette expression, en tenant compte que le champ électrique fait un angle θ avec le directeur, peut se réécrire sous la forme :

$$\vec{D} = \epsilon_{\perp} \vec{E} + (\epsilon_{//} - \epsilon_{\perp})(\vec{n} \cdot \vec{E})\vec{n}$$

L'énergie diélectrique par unité de volume est égale à

$$F = -\int \vec{D} d\vec{E} = -\frac{\epsilon_{\perp}}{2} |\vec{E}|^2 - \frac{\Delta\epsilon}{2} (\vec{n} \cdot \vec{E})^2$$

L'énergie se décompose en deux termes. Le premier ne dépend pas de l'orientation du directeur, le deuxième favorise une orientation spécifique du directeur selon le signe de $\Delta\epsilon$. Cette énergie de réorientation s'exprime :

$$\Delta F = -\frac{\Delta\epsilon}{2} (\vec{n} \cdot \vec{E})^2 = -\frac{\Delta\epsilon}{2} |E|^2 \cos^2 \theta$$

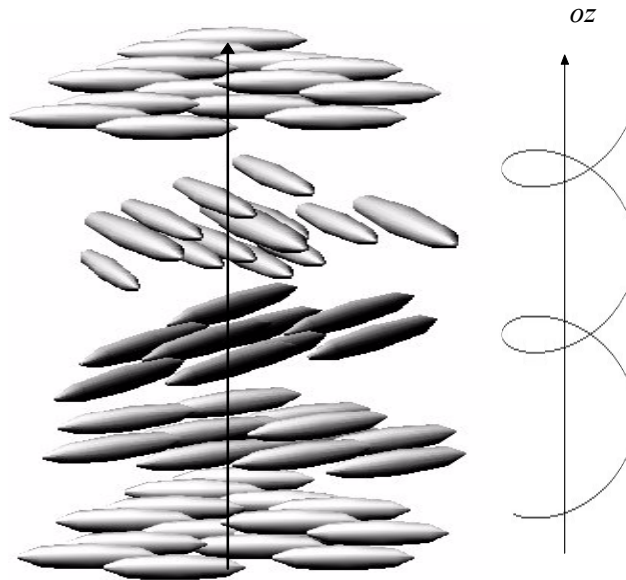
Il est alors facile d'exprimer le couple par unité de volume appliqué sur le matériau :

$$\Gamma = -\frac{\partial \Delta F}{\partial \theta} = \frac{\Delta\epsilon}{2} |E|^2 \sin 2\theta$$

Le maximum du couple est obtenu lorsque θ est égal à 45° .

2.4) Phase cholestérique

L'introduction de molécules chirales dans la phase nématique entraîne une modification macroscopique de la structure nématique caractérisée par un enroulement hélicoïdal. L'axe de cet enroulement est perpendiculaire au directeur n .



Le directeur n varie dans l'espace suivant la loi :

$$\begin{aligned}n_x &= \cos(qz) \\ n_y &= \sin(qz) \\ n_z &= 0\end{aligned}$$

3) Les mésophases smectiques

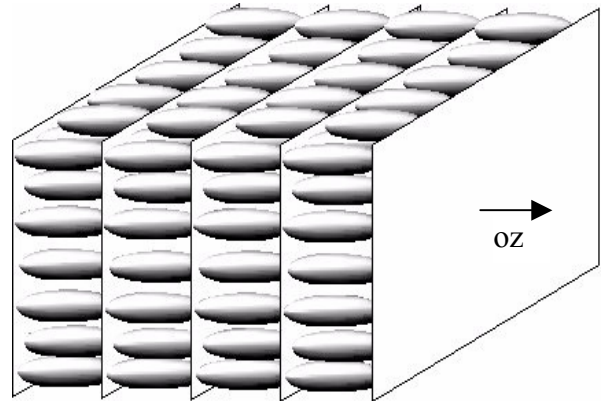
3.1) Phase smectique A

Les phases smectiques se caractérisent par une structure en couche. Il existe un ordre selon l'axe oz , par contre dans le plan des couches la distribution des molécules est désordonnée. Dans le cas de la phase smectique A, le directeur est parallèle à la normale aux couches. Le groupe de symétrie d'une telle structure est $D_{\infty h}$.

La densité de matière se développe en série de Fourier :

$$\rho = \rho_0 + \sum_n A_n e^{in\vec{k}\vec{z}}$$

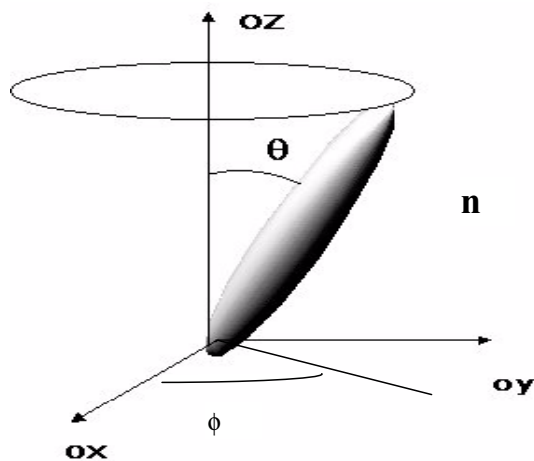
avec $\vec{k} = \frac{2\pi}{d}\vec{z}$ où d est l'épaisseur d'une couche smectique.



Le coefficient à l'ordre 1 de la série de Fourier peut être utilisé comme paramètre d'ordre de la phase smectique.

3.2) Phase smectique C

Elle présente comme la phase smectique A la même structure en couche, mais le directeur est incliné d'un angle θ par rapport à la normale aux couches. Le directeur peut donc évoluer sur un cône d'ouverture 2θ repéré par sa position azimutale ϕ sur le cône. La symétrie d'une telle structure est C_{2h} . En considérant le plan d'inclinaison du directeur, une symétrie par rapport à ce plan ainsi qu'une rotation d'ordre 2 orthogonale à ce plan laissent le système invariant.

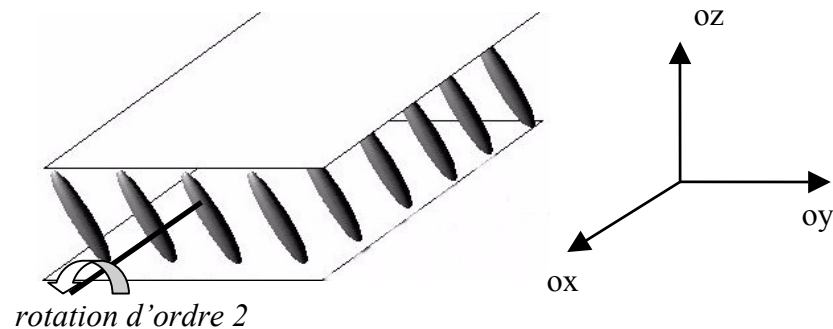


3.3) Phase smectique A*

L'introduction de molécules chirales dans la mésophase smectique introduit certains changements, entre autres l'existence d'une activité optique et d'un effet électroclinique (couplage entre l'orientation du directeur et le champ électrique). Macroscopiquement cette phase demeure une structure uniaxe et elle appartient au groupe de symétrie D_∞ .

3.4) Phase smectique C*

L'introduction de molécules chirales dans la phase smectique C induit de grandes modifications dans la structure. Celle-ci possède le groupe de symétrie C_2 . Macroscopiquement, on observe une structure hélicoïdale qui se forme selon la normale aux couches ; l'angle azimutal précesse selon oz ($\phi = qz$). La perte de la symétrie miroir entraîne également l'existence d'une polarisation spontanée :

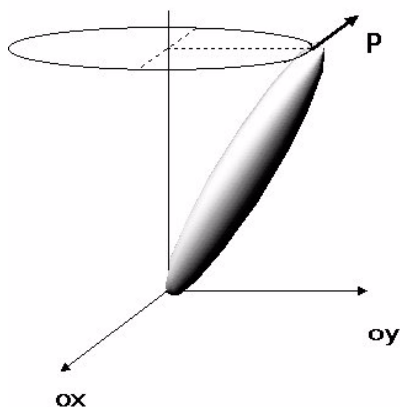


Si la molécule est chirale, la réflexion par rapport au miroir ne laisse plus le système invariant.

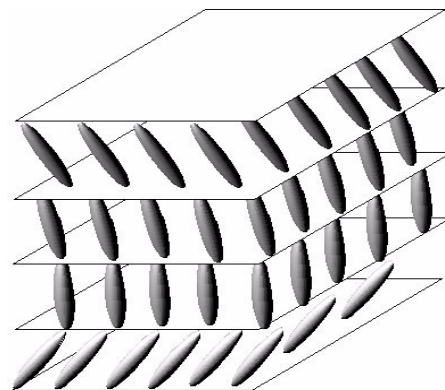
En appliquant l'opération de symétrie C_2 au vecteur polarisation, et en imposant l'invariance de la structure, on obtient:

$$\begin{pmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{pmatrix} \xrightarrow{C_2} \begin{pmatrix} P_x \\ -P_y \\ -P_z \end{pmatrix} \Rightarrow P_x \neq 0 \quad ; \quad P_y = P_z = 0$$

Une polarisation spontanée P_x peut exister dans le plan des couches : Il y a existence de la **ferroélectricité**. Du fait de la structure hélicoïdale, macroscopiquement la polarisation résiduelle est nulle.



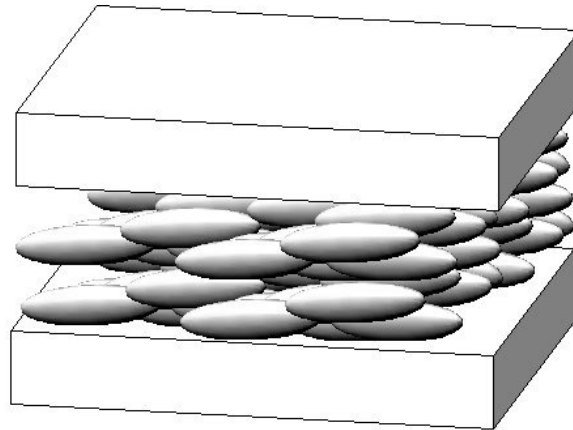
Orientation de la polarisation



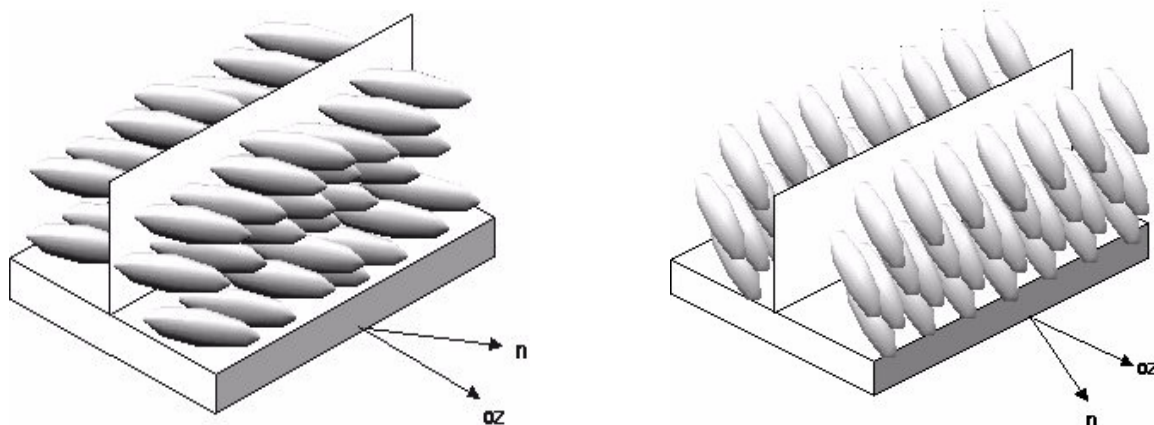
*Structure hélicoïdale de la phase Smectique C**

4) Structure confinée du cristal liquide

Pour les épaisseurs fines de cristal liquide confiné entre deux substrats, l'interaction entre la surface et le matériau cristal liquide conditionne la structure dans le volume. L'épaisseur de cristal liquide est cependant suffisamment importante pour que l'on puisse toujours considérer le cristal liquide comme un système 3D.



L'ancrage aux surfaces doit être anisotrope, c'est à dire que le directeur possède une orientation préférentielle uniforme sur tout l'échantillon. Cette orientation aux surfaces est alors transposée dans le volume. Cette transposition s'explique simplement par le coût énergétique d'une distorsion spatiale du directeur dans le volume. On comprend également que plus l'épaisseur de la cellule est importante, moins la distorsion coûte en énergie. La conséquence la plus spectaculaire est la disparition de la structure hélicoïdale en phase smectique C* (Structure Surface Stabilized Ferroelectric Liquid Crystal). En faible épaisseur cette mésophase est ferroélectrique, elle est caractérisée par l'existence de deux domaines distincts possédant des polarisations opposées. Cette structure possède de plus des propriétés électro-optique très intéressantes ⁽¹⁾.

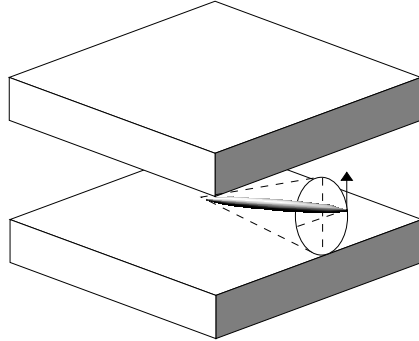


Les deux positions de l'angle azimutal sont données par l'intersection du cône smectique et du plan des électrodes.

⁽¹⁾ "Submicrosecond bistable electro-optic switching in liquid crystals", Clark, N.A. ; Lagerwall, S.T., Applied Physics Letters, Volume 36, Issue 11, 1980, Pages 899-901

5) Dynamique du couplage ferroélectrique.

Le cristal liquide ferroélectrique possède une polarisation spontanée. L'énergie de couplage de la polarisation et du champ appliqué s'exprime: $F = -\mathbf{P} \cdot \mathbf{E}$.



Si le directeur s'écrit $n = (1, \theta \cos \phi, \theta \sin \phi)$ et \mathbf{P} s'écrit : $P = P_0(-\sin \phi, \cos \phi, 0)$. Un champ appliqué selon oy provoquera une variation d'énergie: $-E \delta P$ soit le couple exercé:

$$\Gamma = -\left(\frac{\partial F}{\partial \phi}\right) = P_0 E \sin \phi .$$

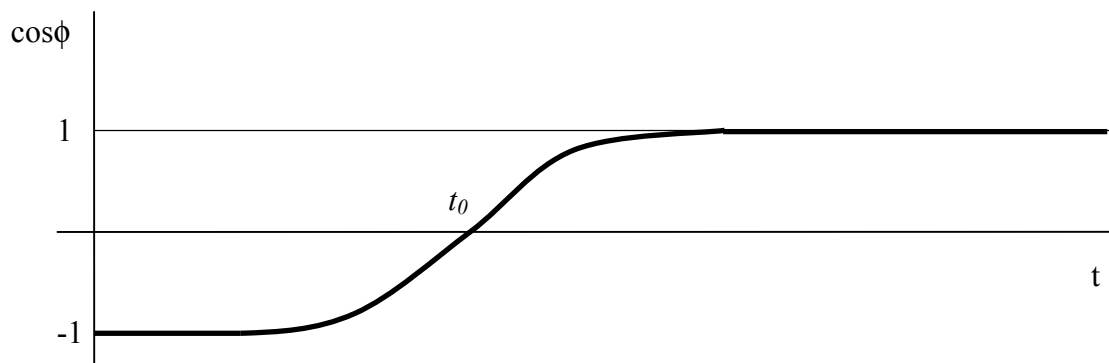
Plusieurs remarques concernant ce couplage : l'effet électro-optique est sensible à la polarité du champ. D'autre part, l'intensité du couple ferroélectrique est en général supérieure au couple nématique (pour des valeurs de champ raisonnables), cela veut dire que la vitesse de commutation du ferroélectrique sera importante. Dans le cas du ferroélectrique, le couple diélectrique, qui existe toujours, est souvent négligé.

On suppose que les couches smectiques sont perpendiculaires aux électrodes. Donnons directement l'équation dynamique en fonction du couple visqueux et du couple ferroélectrique:

$$\gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial t} = P E \sin \phi \quad \gamma_\phi \text{ est la viscosité}$$

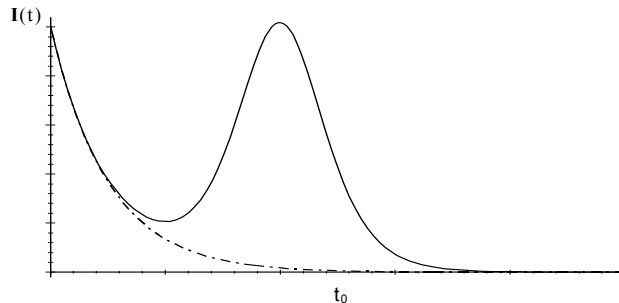
En effectuant le changement de variable: $u = \cos \phi$, on obtient la fonction décrivant temporellement l'évolution de l'angle azimutal:

$$\cos \phi = th\left(\frac{t - t_0}{\tau}\right) \quad \text{avec} \quad \tau = \frac{\gamma_\phi}{PE}$$



Dynamique du retournement de l'axe optique

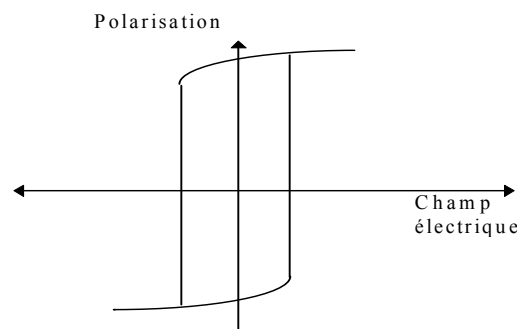
La dynamique de basculement du directeur dépend essentiellement de deux paramètres: τ qui donne le temps de montée et qui est fonction du champ électrique appliqué, et le retard t_0 qui est fonction de la valeur de ϕ au démarrage. Le temps de réponse des cristaux liquides ferroélectriques est de l'ordre de 10-100 μ s. La réponse en courant d'une cellule cristal liquide ferroélectrique lorsque l'on applique un créneau de tension est la suivante :



Réponse en courant d'un cristal liquide ferroélectrique à une tension créneau

Le courant total est la somme du courant de charge de la capacité et du courant induit par la rotation des dipôles : $i(t) = i_c(t) + i_p(t)$. La courbe décroissante correspond à la charge du condensateur, le pic de polarisation correspond à l'excédent de charge dû au retournement des dipôles. La polarisation spontanée peut être calculée par la formule : $2PS = \int i_p(t) dt$.

La dynamique décrit la commutation des dipôles, mais ne permet pas de quantifier la bistabilité. Celle-ci provient principalement de la contrainte sur le directeur aux surfaces. Elle impose en effet que le directeur est une orientation planaire sur les surfaces



Polarisation du cristal liquide ferroélectrique en fonction du champ électrique (cycle d'hystérésis).

6) Transition Smectique A*- Smectique C*

Pour étudier la transition Smectique A*-SmectiqueC*, nous utiliserons la théorie de Landau (théorie champ moyen) qui nous dit qu'il est possible d'effectuer un développement en série de la densité d'énergie libre en fonction des paramètres pertinents : \tilde{Q} , E et P et cela, en respectant la symétrie de la phase de haute symétrie (smectique A*). Le paramètre Q est le paramètre d'ordre primaire. Il est défini par exemple à partir du tenseur de susceptibilité diélectrique : en phase smectique A* la susceptibilité s'écrit :

$$\chi^0_{ij} = \begin{pmatrix} \chi & 0 & 0 \\ 0 & \chi & 0 \\ 0 & 0 & \chi \end{pmatrix} + \frac{1}{3} \begin{pmatrix} \Delta\chi & 0 & 0 \\ 0 & \Delta\chi & 0 \\ 0 & 0 & -2\Delta\chi \end{pmatrix} = \chi \delta_{ij} + \Delta\chi S_{ij}^0$$

Le paramètre d'ordre primaire de la transition SC* - SA* s'écrit :

$$Q_{ij} = (\chi_{ij} - \chi_{ij}^0)$$

A l'ordre 2, on obtient le développement de la densité d'énergie libre :

$$F = \frac{1}{2} a (Q_{xz}^2 + Q_{yz}^2) + c (P_y Q_{xz} - P_x Q_{yz}) + \frac{1}{2\chi} (P_x^2 + P_y^2) - (P_x E_x + P_y E_y) + \dots$$

Avec $a = \alpha(T - T_c)$. Ce paramètre dépend a priori linéairement de la température. D'autre part, il faudrait ajouter des termes d'énergie élastique qui peuvent être couplés au paramètre Q , mais on supposera que la structure est uniforme dans les deux phases.

Compte tenu des relations ; $Q_{xz} = \theta \cos \phi$; $Q_{yz} = \theta \sin \phi$, l'expression de la densité d'énergie se réécrit :

$$F = \frac{1}{2} a \theta^2 - c P \theta - P E + \frac{1}{2\chi} P^2 + \dots$$

Dans le cas où $T > T_c$, l'énergie libre possède un minimum à l'ordre 2, on peut arrêter le développement limité à cet ordre. A l'équilibre : $\frac{\partial F}{\partial \theta} = \frac{\partial F}{\partial P} = 0$

On trouve alors la valeur de l'angle θ induit et la polarisation associée à cette inclinaison :

$\theta = \frac{\chi c}{a^*} E$	$a^* = \alpha(T - T_c^*)$
$P_{ec} = \frac{\chi^2 c^2}{a^*} E$	<p style="text-align: center;">avec :</p> $T_c^* = T_c + \frac{\chi c^2}{\alpha}$

Ces relations sont extrêmement importantes car elles relient au champ électrique deux grandeurs facilement mesurables que sont : θ et P . Sans champ électrique, on obtient $\theta = P = 0$, ce qui caractérise bien la structure de la phase smectique A.

Le couplage entre le champ électrique appliqué et l'inclinaison du directeur est appelé couplage électroclinique. Ce couplage, contrairement au couplage diélectrique, est polaire : il dépend du signe du champ appliqué. Le coefficient électroclinique se définit:

$$e_c = \frac{\chi c}{a^*} \quad (\text{il peut atteindre : } 1,6 \text{ } ^\circ/\text{V} \cdot \mu\text{m}^{-1} \text{ [Walba] }).$$

Pour les champs faibles, la relation de couplage entre θ et le champ électrique est linéaire. Pour des valeurs plus importantes du champ électrique, il existe un phénomène de saturation dû à l'apparition de termes d'ordre supérieur dans le développement de l'énergie libre.

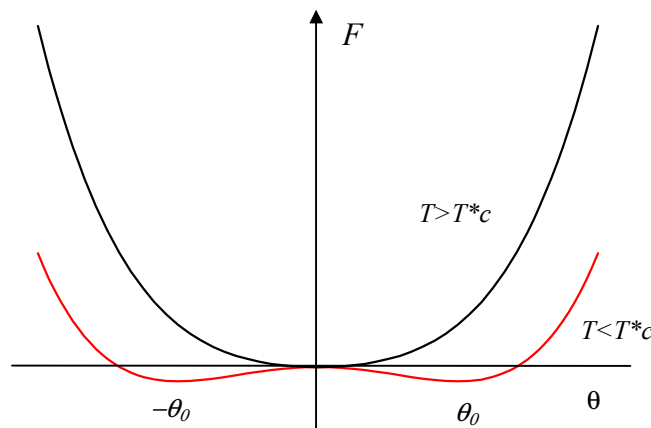
Dans le cas ou $T < T_c$, Il faut rajouter un terme à l'ordre 4 pour retrouver un minimum :

$$F = \frac{1}{2} a \theta^2 - c P \theta - P E + \frac{1}{2 \chi} P^2 + \frac{b}{4} \theta^4 + \dots$$

En phase smectique C* , sans champ électrique appliqué, on voit que la densité d'énergie libre pour $T > T_c^*$ possède un minimum pour $\theta_0 \neq 0$ dont la valeur est donnée par l'expression:

$$\theta_0 = \sqrt{\frac{-\alpha(T - T_c^*)}{b}}$$

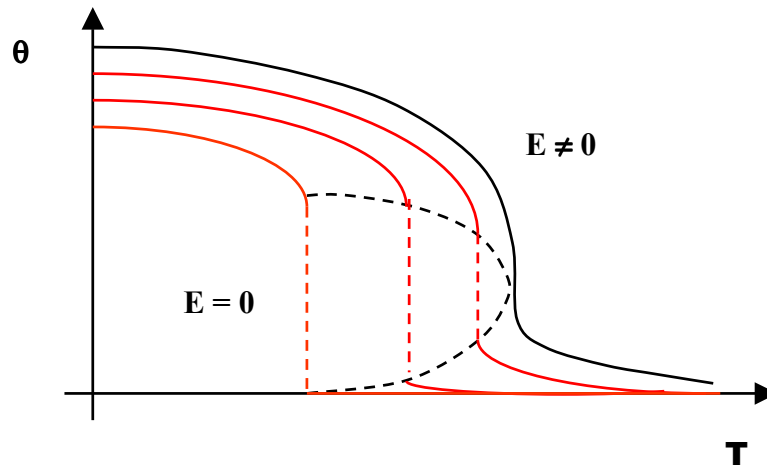
$$P_0 = \chi c \theta_0$$



Energie libre en fonction de θ

Le paramètre d'ordre θ varie continûment à la transition, ce qui est typique d'une transition de second ordre. Cependant, l'expression de l'énergie libre précédente est approximative : les termes d'ordre 4, homogènes à $\theta^2 P^2, \theta P^3, \theta^3 P, P^4$ ont été négligés dont certains correspondent au paramètre d'ordre biaxe. Il faut donc supposer que la valeur de la polarisation spontanée est assez faible, sinon ces couplages peuvent intervenir dans la renormalisation du terme homogène à θ^4 , ce qui peut entraîner un changement de signe du coefficient d'ordre 4 et donc un changement d'ordre de la transition. Ce phénomène a été observé dans des composés ayant une forte polarisation.

Le diagramme de phase de la transition SmA – SmC* en présence de champ électrique est alors le suivant.



L'expression de la densité d'énergie libre précédente n'en demeure pas moins une formulation simple permettant d'obtenir quelques résultats fondamentaux : comportement de θ et P en fonction de la température, mise en évidence de la brisure de symétrie lors de la transition de phase. En phase smectique C* et en présence d'un champ électrique, il est possible d'écrire θ et P sous la forme :

$$\begin{aligned}\theta &= \theta_0 + \delta\theta(E) \\ P &= P_0 + \delta P(E)\end{aligned}$$

En minimisant l'énergie libre par rapport à θ et P et en utilisant les relations précédentes, on trouve que :

$$\begin{array}{l} \delta\theta = \frac{\chi c}{2a^*} E \\ \delta P = \frac{\chi^2 c^2}{2a^*} E \end{array} \quad \text{avec :} \quad \begin{array}{l} a^* = \alpha(T_c^* - T) \\ T_c^* = T_c + \frac{\chi c^2}{\alpha} \end{array}$$

En phase smectique C, le coefficient électroclinique est 2 fois plus faible pour le même écart en température de part et d'autre de T_c^* .

7) Dynamique de l'effet électroclinique

7.1) Equations dynamiques

Les équations dynamiques s'écrivent :

$$\gamma_{\theta} \frac{\partial \theta}{\partial t} = - \frac{\partial F}{\partial \theta}$$

$$0 = \frac{\partial F}{\partial P}$$

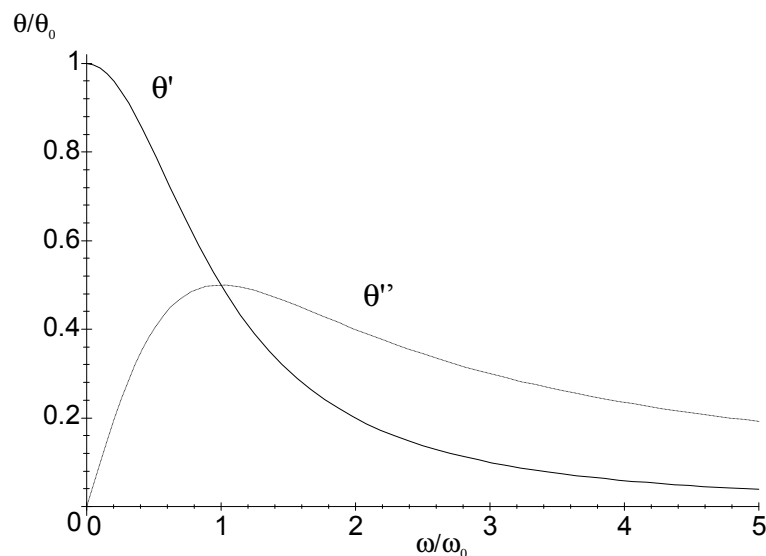
On considère que la viscosité relative aux dipôles est négligeable.

En phase Smectique A*, en résolvant ces équations en régime harmonique (excitation sinusoïdale du champ électrique $E = E_0 e^{i\omega t}$), on trouve :

$$\theta = \frac{\chi c E_0}{a^* (1 + i(\omega / \omega_0))}$$

$$P = \left(\chi + \frac{\chi^2 c^2}{a^* (1 + i(\omega / \omega_0))} \right) E_0 \quad \text{avec} \quad \omega_0 = \frac{a^*}{\gamma_{\theta}}$$

En fonction de la pulsation, on obtient la partie réelle et imaginaire de l'angle θ :



Expérimentalement, il est possible de caractériser, en effectuant un balayage en fréquence, l'effet électroclinique par des mesures optique et diélectrique. Ces deux types mesures simultanées à différentes températures permettent d'obtenir la fréquence de relaxation et donne également accès aux valeurs des coefficients : χ , α , γ_{θ} , c . On observe qu'à l'approche de la transition Smectique A*-Smectique C* la fréquence de relaxation tend vers zéro, d'où l'appellation « Soft mode ».

En phase smectique C*, l'application d'un champ du type : $E = E_1 + \delta E e^{i\omega t}$ nous donne le comportement fréquentiel suivant :

$$\delta\theta = \frac{\chi c}{-2a^*(1+i(\omega/\omega_0))} \delta E$$

$$\delta P = \left(\chi + \frac{\chi^2 c^2}{-2a^*(1+i(\omega/\omega_0))} \right) \delta E$$

avec : $a^* = \alpha(T_c^* - T)$
 $\omega_0 = 2 \frac{a^*}{\gamma_\theta}$

Le champ électrique constant a pour rôle de bloquer la rotation du directeur sur le cône. Les fréquences de relaxation sont deux fois plus élevées qu'en phase smectique A* pour un même écart en température par rapport à T_c^* .

7.2) Montage expérimental

Le cristal liquide est confiné entre deux plaques de verre avec un dépôt conducteur transparent d'ITO. L'alignement de la cellule se fait par cisaillement de l'échantillon à la transition Isotrope-Smectique A*.

L'échantillon cristal liquide est ensuite placé dans un four thermostaté. Un faisceau Laser ($\lambda=633$ nm) passant au travers de l'échantillon est détecté après un polariseur croisé avec la polarisation incidente du laser. L'orientation de la cellule est à $22,5^\circ$ de la polarisation du laser afin de linéariser la modulation d'intensité par rapport à θ . Une tension modulée, à fréquence variable, est appliquée sur la cellule, le signal détecté par la photodiode est ensuite mesuré par la détection synchrone.

Les mesures diélectriques s'effectuent en mesurant le courant électrique dans le circuit : la cellule est en effet assimilable à une capacité, le courant I et la tension U sont reliés par la relation :

$$U = \frac{I}{iC\omega} \Rightarrow I = iC\omega U = i\varepsilon \frac{S}{4\pi e} \omega U \quad \text{CGS}$$

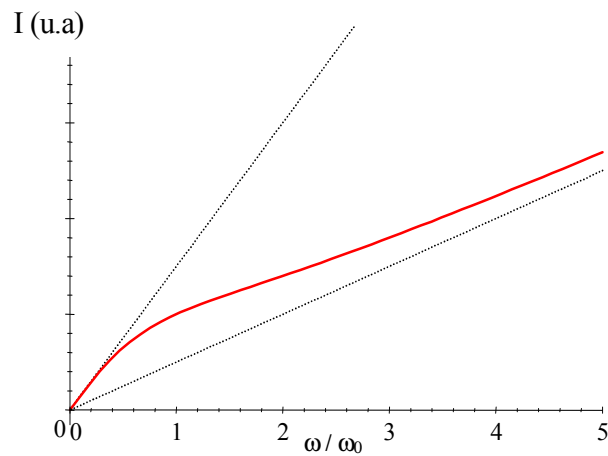
La valeur du courant est simplement obtenue en mesurant la tension aux bornes d'une résistance insérée dans le circuit électrique.

Compte tenu l'expression de la polarisation, on obtient alors facilement l'expression de la permittivité diélectrique :

$$D = (1 + 4\pi\chi)E = \left(1 + 4\pi\chi + \frac{4\pi\chi^2 c^2}{a^*(1+i(\omega/\omega_0))} \right) E_0 \Rightarrow \varepsilon = \varepsilon_\infty + \frac{\Delta\varepsilon}{(1+i(\omega/\omega_0))} \quad \text{CGS}$$

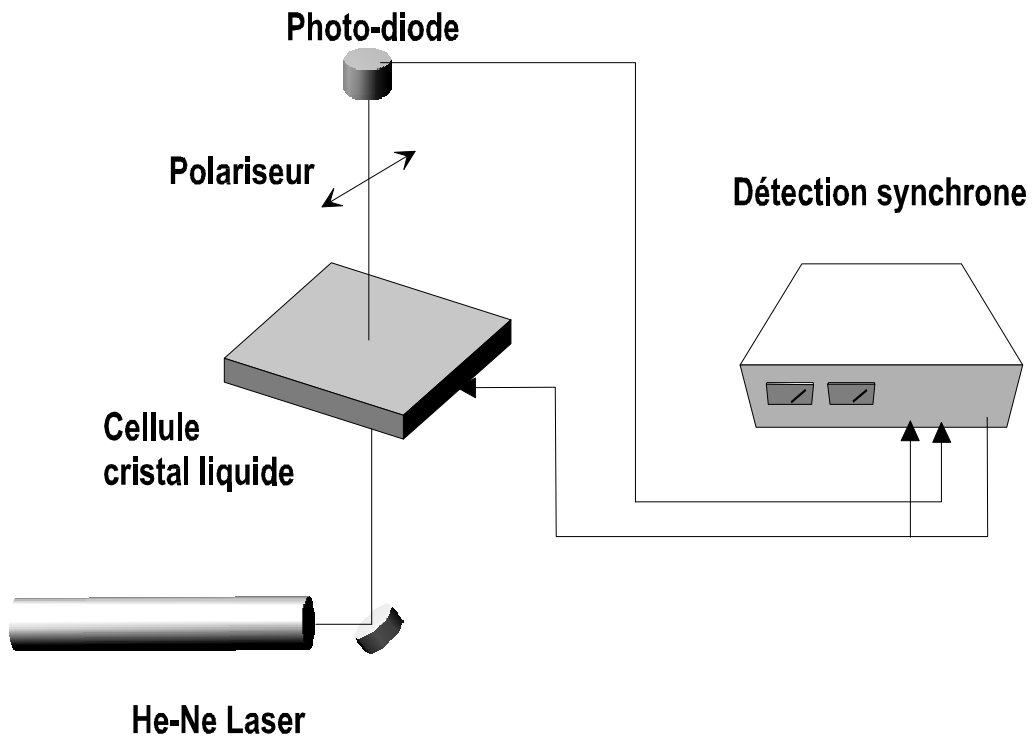
La permittivité diélectrique est constituée d'une composante que l'on peut considérer indépendante de la fréquence de modulation (contributions électronique, moléculaire, etc.) et de la contribution de l'effet électroclinique.

La réponse en courant du circuit est du type :



Comportement du courant électrique dans le circuit en fonction de la fréquence excitation.

La réponse optique donne une information plus précise sur la fréquence de relaxation. Le principe optique de la mesure est d'étudier le comportement de θ en faisant passer un faisceau laser au travers d'une cellule à cristal liquide alignée entre polariseur et analyseur croisés. L'intensité est détectée par une photodiode et le signal électrique est envoyé sur une détection synchrone (lock-in Amplifier). La cellule est placée dans un thermostat régulé au 1/100°C.



Montage expérimental de la mesure optique.

Conclusions

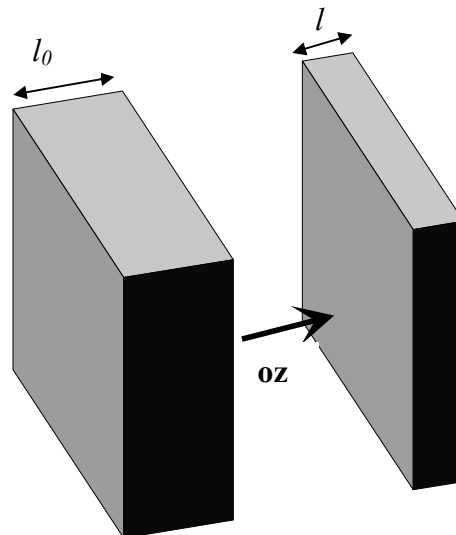
Les différentes expériences ont permis de remonter aux différentes grandeurs (optique et diélectrique) avec une très bonne précision pour un grand nombre de cristaux liquides . De ces grandeurs expérimentales, il a été possible de remonter à la valeur de certains paramètres tels des coefficients du développement de l'énergie libre α et c , la viscosité, la susceptibilité. Il a été également possible de valider expérimentalement le facteur 2 qui apparaît dans la dynamique de l'effet électroclinique au passage de la transition SmA-SmC*.

Une transition SmA-SmC* de premier ordre a été également observée pour un composé à forte polarisation spontanée (famille des isoleucines).

8) Les couches smectiques en structure confinée (structure chevron)

La structure Chevron fut découverte expérimentalement en 1996 par l'équipe de N.C. Clark (Boulder) avec une étude aux rayons X d'une structure dite « SSFLC » ⁽¹⁾. Jusqu'alors les défauts observés dans ces structures (défauts zigzag) restaient inexplicables. Les résultats expérimentaux ont montré que les couches smectiques en phase SC n'étaient pas perpendiculaires au substrat, mais possédaient une structure en chevron. Cette structure permettait donc d'expliquer à la fois les défauts observés mais aussi les problèmes de bistabilité rencontrés. L'origine de cette structure est la compression des couches qui apparaît en phase smectique C. Dans les structures confinées, cette compression entraînerait un déplacement macroscopique des couches smectiques. Prenons la variable $u_z(x,y)$ qui décrit le déplacement des couches selon l'axe oz. L'épaisseur des couches avant compression est l_0 , la nouvelle épaisseur de couches est l . La variation relative des couches est donnée par :

$$\frac{\partial u}{\partial z} \approx \frac{l-l_0}{l_0}$$



Si on considère les molécules comme des bâtonnets rigides dans la couche smectique, nous avons la relation suivante:

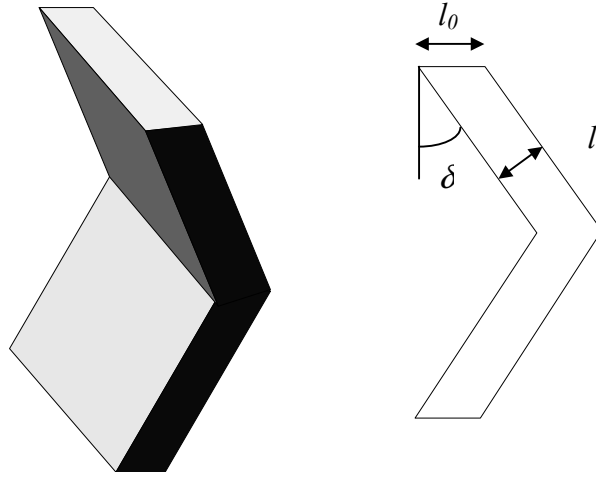
$$l = l_0 \cos \theta \approx l_0 \left(1 - \frac{\theta^2}{2} \right) \Rightarrow \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{\theta^2}{2} \quad \theta \text{ est l'angle de tilt}$$

Dans le cas le plus général, une relation phénoménologique semble beaucoup plus réaliste :

$$l \approx l_0 \left(1 - \gamma \frac{\theta^2}{2} \right)$$

Une solution énergétiquement plus favorable est l'inclinaison des couches smectiques.

(1) "Chevron local layer structure in surface-stabilized ferroelectric smectic-C cells" Rieker, T.P.; Clark, N.A.; Smith, G.S.; Parmar, D.S.; Sirota, E.B.; Safinya, Physical Review Letters Volume 59, Issue 23, 1987, Pages 2658-2661



Structure en chevron des couches smectiques en géométrie confinée

L'épaisseur des couches inclinées d'un angle δ est : $l = l_0 \cos \delta \approx l_0 \left(1 - \frac{\delta^2}{2}\right)$ avec $\delta = \frac{\partial u}{\partial y}$

la variation relative totale d'épaisseur de couches s'exprime en fonction de u :

$$\eta = \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{l}{2} \left(\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 \right) \quad (1)$$

Pour une certaine température, l'épaisseur nominale des couches doit être égale à :

$$l' \approx l_0 \left(1 - \gamma \theta^2 / 2\right) = l_0 \left(1 - \Theta^2 / 2\right)$$

L'énergie de compression sera définie en fonction de l'écart entre la variation relative l'épaisseur de couche nominale et celle des couches réelles. Dans le cas du cristal liquide en structure confinée, on supposera qu'il n'y a pas de déplacement de matière selon l'axe oz donc : $\frac{\partial u}{\partial z} = 0$. Mais cette énergie ne doit pas dépendre du signe de cette différence, on a donc

l'expression phénoménologique de la densité d'énergie de compression suivante :

$$F = \frac{B}{4} \left(\frac{l}{2} \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 \right] - \frac{\Theta^2}{2} \right)^2$$

Cette densité d'énergie contenue dans la couche s'ajoute à la densité d'énergie élastique de Frank-Osen pour le directeur et permet d'expliquer la formation des chevrons.

(1) L'énergie en phase smectique est invariante par rotation. Elle doit donc être construite avec un paramètre qui vérifie cette propriété : Le paramètre η est bien invariant par rotation.

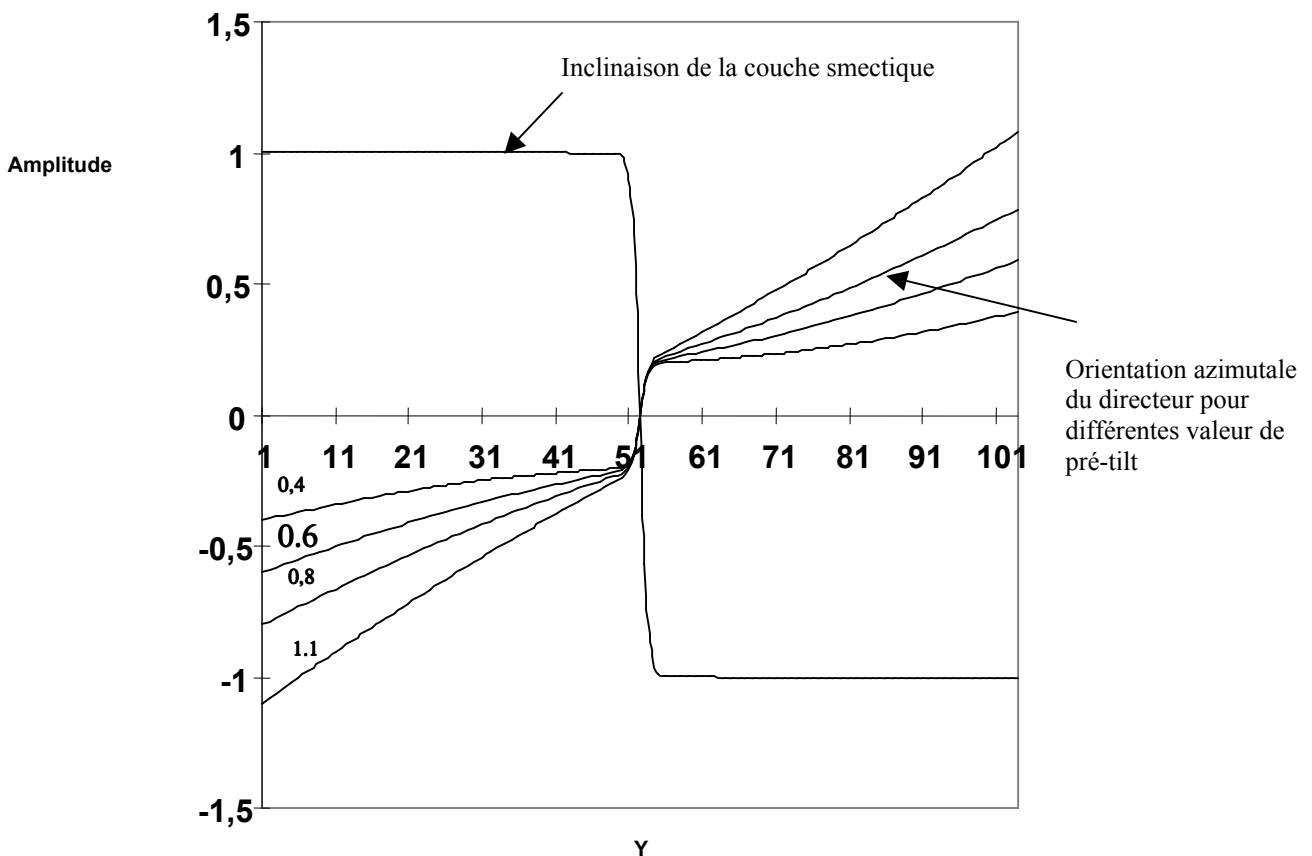
Les relations entre la géométrie de la couche smectique et celle du directeur sont les suivantes :

$$\begin{aligned} n_x &\approx -\frac{\partial u}{\partial x} + \theta \cos \varphi \\ n_y &\approx -\frac{\partial u}{\partial y} + \theta \sin \varphi \\ n_z &\approx 1 \end{aligned}$$

A partir de l'expression de l'énergie libre :

$$\begin{aligned} F = \frac{1}{2} &\left(K_1 \left(\frac{\partial \delta}{\partial y} \right)^2 + K_2 \left(\frac{\partial \varphi}{\partial y} \right)^2 + 2C \left(\frac{\partial \sin \varphi}{\partial y} \right) \left(\frac{\partial \delta}{\partial y} \right) \right) \\ &+ B / 4 \cdot (\delta^2 - \Theta^2)^2 \end{aligned}$$

Par minimisation de l'énergie, il est possible de décrire la structure des couches : évolution de l'angle du chevron et la distribution spatiale du directeur :



Evolution du directeur et de l'inclinaison des couches dans une structure chevron uniforme

Conclusions

On observe que quelles que soient les conditions d'ancrage aux surfaces, l'angle azimutal est bloqué à 0° ou à π à la pliure du chevron.

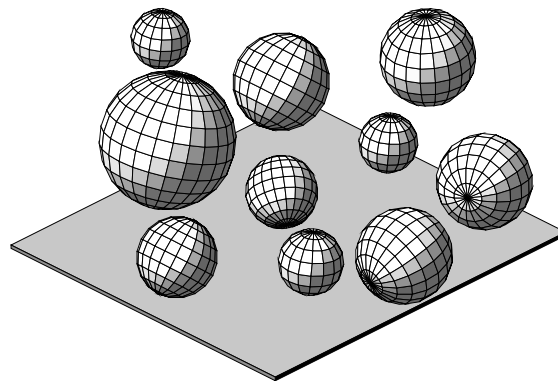
Pour imposer la bistabilité, plusieurs solutions ont été proposées : redressement des couches par un champ électrique. Ce type de texture est, en général, caractérisée par une ondulation des couches dont la direction se situe dans le plan du substrat (texture stripe).

L'autre possibilité est le choix d'un pré-tilt important, ce qui permet de compenser la réduction de l'angle apparent de bistabilité par le chevron.

9) Les structures composites : polymère / cristaux liquides

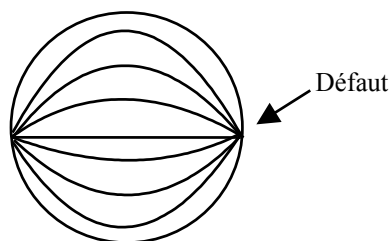
9.1) Polymer Dispersed Liquid Crystal

Ces structures sont constituées par une dispersion de gouttelettes de cristal liquide dans du polymère. Plusieurs techniques peuvent être utilisées pour obtenir de telles structures. La plus utilisée est celle de la séparation de phase par polymérisation : on part d'un mélange homogène en phase isotrope: cristal liquide, monomère et photo-initiateur. Ce mélange est mis sous rayonnement UV et la réaction de polymérisation démarre. Le cristal liquide n'étant pas soluble dans le polymère une démixtion (séparation de phase) intervient, entraînant la formation de gouttelettes de cristal liquide dans le polymère. Au fur et à mesure de la polymérisation les gouttelettes vont croître jusqu'à ce que la matrice de polymère soit formée, ce qui entraîne la fixation de la structure. Dans de telles structures, la connexité des gouttelettes dépend de la proportion de polymère par rapport au cristal liquide.



Gouttelettes de cristal liquide

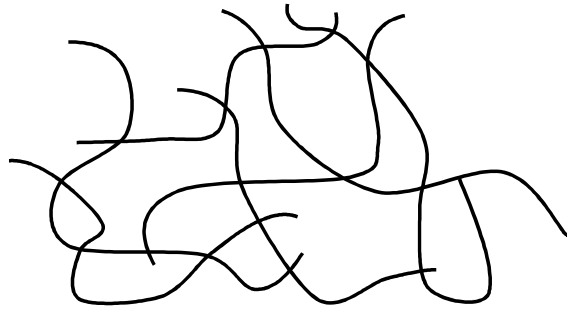
La cinétique de cette séparation de phase dépend de nombreux paramètres : la température, la puissance UV, le pourcentage de cristal liquide dans le mélange initial, la solubilité du cristal liquide dans le monomère etc. Tous ces paramètres sont à contrôler précisément pour obtenir la structure voulue. La structure du cristal liquide dans une gouttelette est généralement bipolaire : le champ du directeur est de géométrie cylindrique avec l'axe de symétrie passant par deux défauts situés en opposition dans la gouttelette :



L'orientation du cristal liquide dans ces gouttelettes est aléatoire puisque le mélange de départ est isotrope : il n'y a pas d'orientation privilégiée du cristal liquide.

Dans le cas où la proportion de monomère est très faible (5% - 1%) on obtient alors un enchevêtrement de chaînes de polymère (réseau polymérique) qui structure le cristal liquide

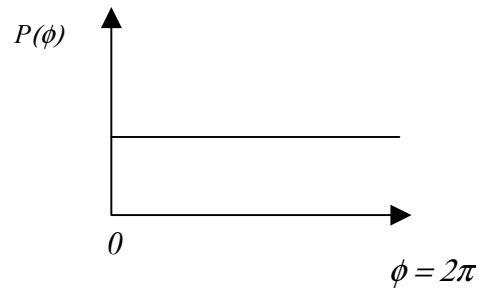
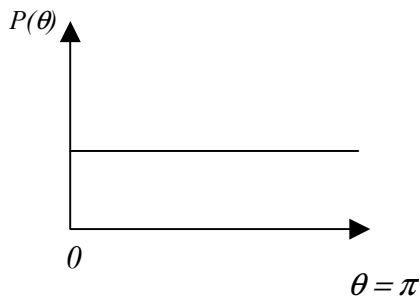
en domaine connexe. Les domaines cristaux liquides peuvent avoir des propriétés différentes selon que le mélange initial se trouve en phase isotrope ou en phase nématique.



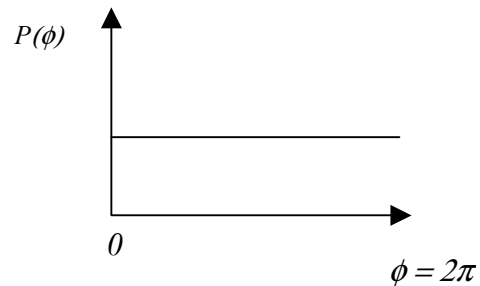
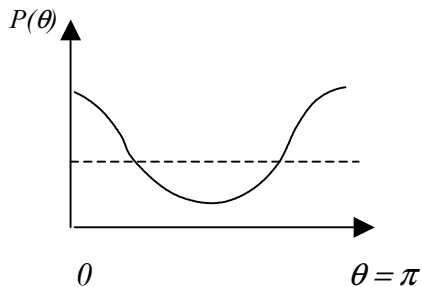
Réseau polymérique

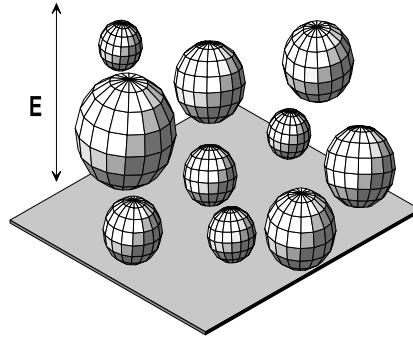
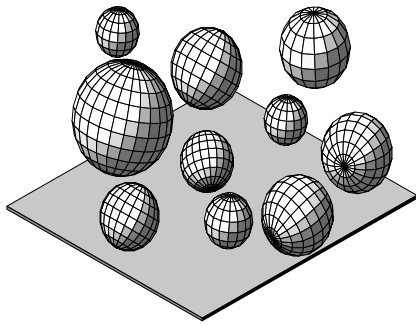
9.2) Mécanisme de diffusion et effet électro-optique

Une structure hétérogène de ce type est naturellement diffusante si les matériaux n'ont pas le même indice. Dans le cas du PDLC, prenons un cristal liquide nématique dont l'indice ordinaire est le même que le polymère. L'orientation du directeur (défini par l'angle zénithal θ et azimutal ϕ par rapport à l'axe oz) dans une gouttelette étant parfaitement aléatoire, sur un volume important la probabilité d'avoir une orientation donnée est constante.



L'application d'un champ électrique selon oz va induire une réorientation du directeur dans les gouttelettes par couplage diélectrique selon cet axe qui devient axe de symétrie.





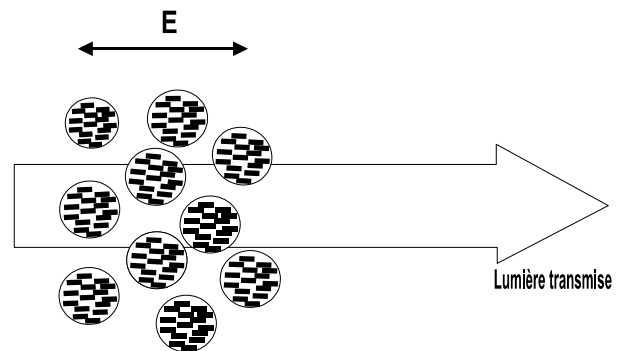
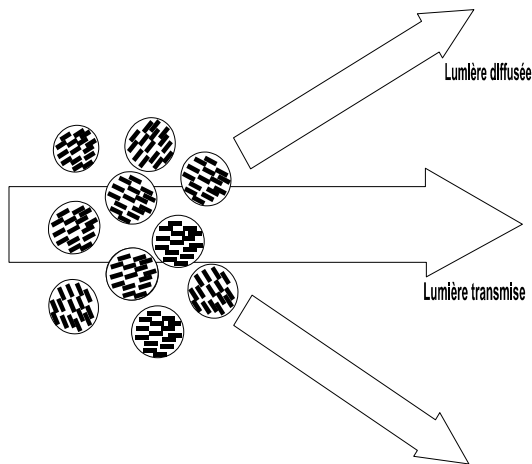
PDLC sans champ électrique appliqué

PDLC avec champ électrique appliqué

L'indice d'une gouttelette dont le directeur fait un angle θ avec la direction de propagation d'un faisceau est donné par la relation :

$$\frac{1}{n^2(\theta)} = \frac{\cos^2(\theta)}{n_o^2} + \frac{\sin^2(\theta)}{n_e^2}$$

Sans champ l'orientation est aléatoire ; le faisceau va voir des gouttelettes dont l'indice est compris entre n_o et n_e dans un milieu d'indice $\approx n_o$ (polymère). Il y a donc désadaptation de l'indice entre la majorité des gouttelettes et de la matrice de polymère : la structure est diffusante. L'application d'un champ électrique entraîne la réorientation du cristal liquide selon la direction du champ électrique : la lumière, quelle que soit sa polarisation, voit alors l'indice n_o du cristal liquide qui est très proche de celui du polymère. La structure est transparente :



PDLC sans champ électrique

PDLC avec champ électrique

9.3) PDLC avec nano-gouttelettes

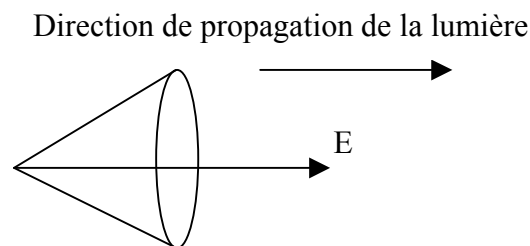
Système hétérogène constitué de gouttelettes de cristal liquide dans une matrice de polymère. Ce système, lorsque les gouttelettes de cristal liquide sont petites devant la longueur d'onde, ne possède pas d'effet de diffusion. Sans champ électrique appliqué, il y a une répartition statistique du vecteur directeur dans les gouttelettes. L'onde se propageant dans le milieu voit un indice moyen entre celui du cristal liquide et celui du polymère. L'indice du cristal liquide moyenné sur toutes les gouttelettes est égal à :

$$\bar{n}_{cl} \cong \frac{2n_o + n_e}{3}$$

L'application d'un champ électrique provoque la réorientation du cristal liquide, ce qui se traduit par une modulation de biréfringence.

L'effet électro-optique peut être utilisé de deux façons différentes :

1) Lorsque le champ est colinéaire à la propagation de la lumière. Le champ électrique provoque une réorientation du cristal liquide dans les gouttelettes. Le vecteur directeur du cristal liquide dans les gouttelettes va avoir tendance à s'aligner sur le champ électrique appliqué mais, statistiquement, les directions dans chacune des gouttelettes est réparties sur un cône dont l'axe de symétrie est le champ appliqué. L'onde verra alors un milieu qui reste isotrope quel que soit le champ appliqué.



Cône d'iso-probabilité de l'orientation des gouttelettes en présence de champ électrique

Seul, l'indice moyen du matériau change. Une expression phénoménologique en donne la variation :

$$\bar{N} = xn_{cl}(E) + (1-x)n_{polymère}$$

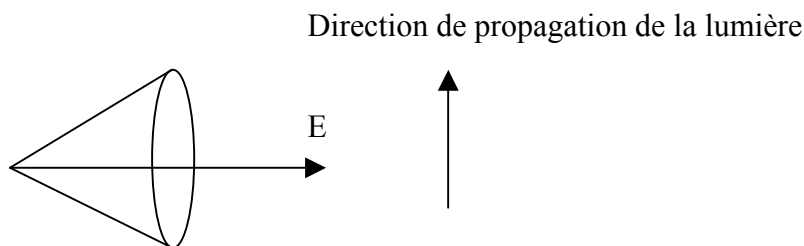
$n_{cl}(E)$ désigne l'indice du cristal liquide moyenné sur toutes les gouttelettes qui dépend du champ électrique appliqué, x la proportion relative de cristal liquide par rapport à celle du polymère.

Des études ont montré que l'évolution de l'indice du matériau suivait, pour les faibles valeurs de champs électrique, la loi :

$$\delta n = \alpha E^2$$

Avec $\alpha = 5.10^{-5} \mu m^2/V^2$

2) Lorsque que le champ appliqué est perpendiculaire à la direction de propagation, l'onde n'est plus colinéaire à l'axe de symétrie du matériau : l'axe de symétrie est imposé par le champ électrique. L'onde verra alors un matériau biréfringent. Sans champ électrique, l'onde voit le même indice effectif que dans le premier cas.



Cône d'iso-probabilité de l'orientation des gouttelettes dans le cas de la propagation orthogonale au champ électrique.

Des mesures ont montré que pour des tensions de l'ordre de 10 V / μm des biréfringences de l'ordre de 0,01 ont été obtenues pour des pertes par diffusion acceptables.

Tableau récapitulatif pour le PDLC avec nano-gouttelettes

Géométrie	Indice sans champ	Indices avec champ en saturation
	$\bar{N} = x\bar{n}_{cl} + (1-x)n_{polymère}$ avec $\bar{n}_{cl} \cong \frac{2n_o + n_e}{3}$	Milieu isotrope : $\bar{N} = x\bar{n}_o + (1-x)n_{polymère}$ n_o : l'indice ordinaire du cristal liquide
	$\bar{N} = x\bar{n}_{cl} + (1-x)n_{polymère}$ avec $\bar{n}_{cl} \cong \frac{2n_o + n_e}{3}$	Milieu biréfringent : $\bar{N}_o = x\bar{n}_o + (1-x)n_{polymère}$ $\bar{N}_e = x\bar{n}_e + (1-x)n_{polymère}$

Il existe une relation simple entre le déphasage isotrope et anisotrope :

Dans le cas isotrope, l'indice moyen du cristal liquide sans champ est : $\bar{n}_{cl} \cong \frac{2n_o + n_e}{3}$ en appliquant un champ électrique, il devient : $\bar{n}_{cl} = n_o$. La variation de phase maximum sur une épaisseur L de cristal liquide est donc égale à :

$$\Delta \phi_{//} \cong x \frac{2\pi}{\lambda} \left[\frac{2n_o + n_e}{3} - n_o \right] L \cong x \frac{2\pi}{\lambda} \frac{\Delta n}{3} L$$

Avec x : la proportion de cristal liquide. Lorsque le champ est transversal, la biréfringence maximale du cristal liquide est $\Delta n = n_e - n_o$. Le déphasage anisotrope maximum pour la même épaisseur de cellule est égal à :

$$\Delta \phi_{\perp} = x \frac{2\pi}{\lambda} \Delta n L \text{ soit : } \Delta \phi_{\perp} \cong 3 \Delta \phi_{\parallel}$$

Cette relation permet d'évaluer la biréfringence induite à partir du déphasage isotrope avec des cellules standards.

Conclusions

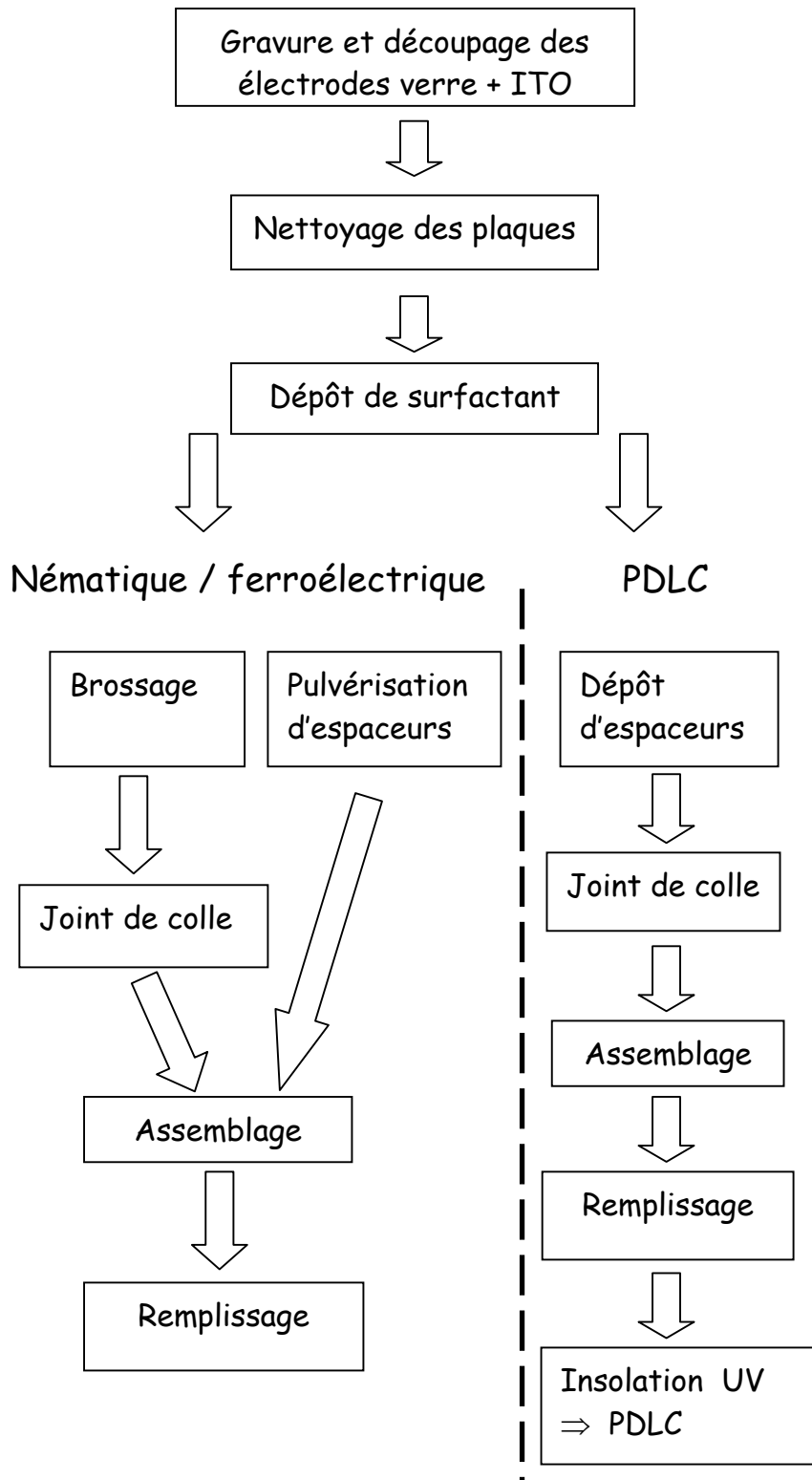
Ces structures composites cristal liquide/polymère présentent des caractéristiques physiques et optiques extrêmement intéressantes pour des applications dans les télécommunications optiques. Ce sont des structures très stables une fois que la polymérisation est complète. Les effets électro-optiques : diffusion et déphasage sont intrinsèquement insensibles à l'état de polarisation de la lumière, ce qui permet de simplifier le design des composants. Les temps de réponse sont relativement brefs (50 μ s pour les nano-PDLC) ce qui autorise l'élargissement du champ d'application de ces matériaux.

II

La technologie cristal liquide

Le principe général de la technologie cristal liquide est de confiner ce matériau entre deux substrats transparents. L'épaisseur de cristal liquide est de quelques microns pour les cristaux liquides standards travaillant dans le visible jusqu'à quelques dizaines de microns pour les structures PDLC.

Le synopsis de la technologie est le suivant :



1) Le process

1.1 Le verre utilisé pour les modulateurs

Les verres utilisés sont des borosilicates de 1,1 mm et 2,2 mm d'épaisseur. Les principaux fournisseurs sont Corning et Hoya. Les verres épais : 2,2 mm sont des verres de qualité optique. Les verres épais sont utilisés pour réaliser des modulateurs nécessitant très peu de distorsion de plan de phase (modulateur disposé dans le plan de Fourier) ainsi que des modulateurs ayant une bonne uniformité d'épaisseur : c'est, dans ce cas, la rigidité du verre qui est exploitée. Les plaques de verre subissent ensuite un dépôt d'ITO (Indium Tin Oxide) d'épaisseur variable. Plus l'épaisseur est importante, plus la résistance par carré diminue. Il existe une limitation pour l'épaisseur de l'ITO car celui-ci absorbe le rayonnement, notamment dans le spectre infrarouge.

1.2 Gravure des électrodes

L'étape de gravure s'effectue par la photolithographie standard ou par technique « Reactive Ions Etching ».

1.3 Nettoyage

Le nettoyage des plaques est peut être l'étape la plus importante de la technologie. Son but est double:

- Enlever les poussières pouvant empêcher que la cellule ait la bonne épaisseur ou alors, provoquer un court circuit dans la cellule.
- Enlever tout dépôt de substance pouvant perturber les étapes suivantes : graisse, hydrocarbure etc.

Cette opération s'effectue en deux étapes :

1. bain associé à un détergent (Décon) dans une cuve à ultrason.
2. nettoyage rapide (1-2 seconde) à l'acide sulfochromique.

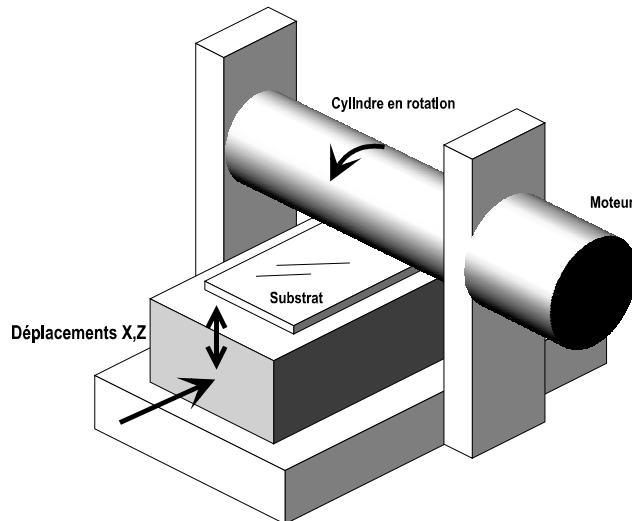
Le test de propreté consiste à tester la mouillabilité du substrat en y déposant une goutte d'eau et observer si elle s'étale correctement.

1.4 Dépôt de surfactant

Le rôle du polymère est de contrôler les caractéristiques d'ancrage (géométrique et énergétique) du cristal liquide sur le substrat. Plusieurs types de polymères et surfactant ont été testés : Polyvinyl Alcool (PVA), Polyimide, Nylon, Polysiloxane, silane. Ces surfactants sont mis en solution puis déposés sur le substrat par Spin coating. Après séchage et cuisson un film homogène est obtenu.

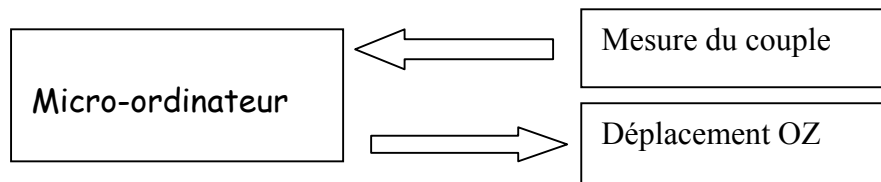
1.5 Brossage

Le rôle du brossage est d'induire dans le film de surfactant une direction privilégiée pour le cristal liquide. Les substrats sont mis sur un système de micro-déplacements motorisés OXZ qui les déplace sous un cylindre en rotation recouvert de velours. Le frottement de ce dernier sur le polymère va induire une anisotropie qui orientera le cristal liquide selon la direction de frottement (OZ).



Machine de brossage pour dépôt de polymère

Le paramètre important de cette étape est le couple de frottement sur le substrat. Trop de frottement dégrade le polymère et génère des défauts d'alignement du cristal liquide, pas assez de frottement et le cristal liquide ne s'oriente pas. Le couple doit donc être contrôlé précisément. Pour cela un asservissement sur le déplacement en OZ à été installée avec mesure du couple de frottement.



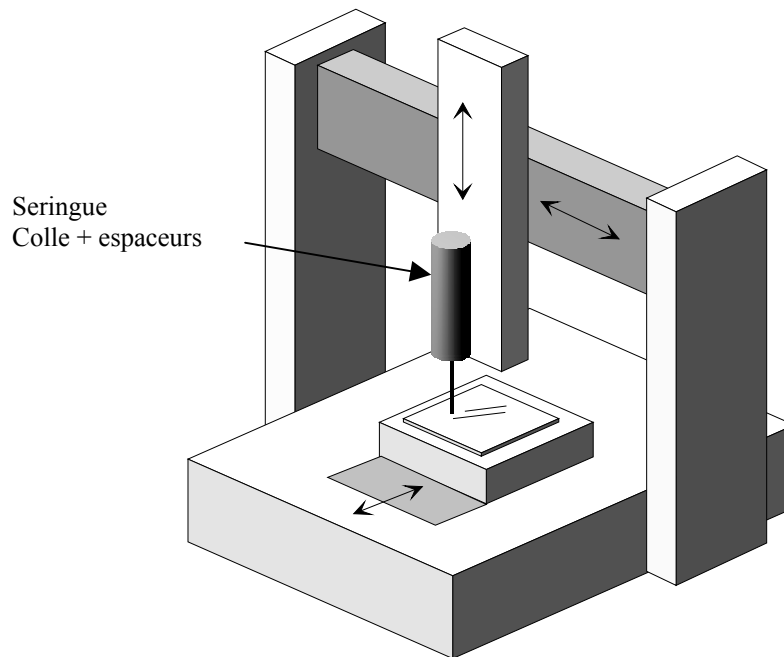
1.6 Dépôt d'espaceurs

Le dépôt d'espaceurs se fait de deux manières. Pour le cristal liquide standard, le dépôt se fait par pulvérisation. Cette technique a l'avantage de ne pas perturber l'effet de l'étape de brossage.

Par contre, lorsqu'il s'agit de PDLC où les conditions d'ancrage aux surfaces ne jouent pas un rôle déterminant sauf dans le cas des cristaux liquides avec un réseau de polymère, les espaceurs sont mis en solution (Isopropanol) puis déposés par Spin Coating.

1.7 Joint de colle

Le joint de colle est déposé à l'aide d'un dispensateur piloté par un système de déplacement XYZ. La colle qui contient des espaceurs calibrés à l'épaisseur de la cellule est mise dans une seringue. Celle-ci est mise en pression et la colle est déposée sur le substrat. Le cordon de colle est ouvert en deux endroits : la première ouverture est destinée au remplissage du cristal liquide, la deuxième pour créer le vide à l'intérieur de la cellule.



Machine de dépôt de colle

1.8 Assemblage

Les deux plaques sont positionnées en vis à vis, puis mises en sachet sous vide. La pression atmosphérique applique uniformément une pression sur la cellule afin d'obtenir une épaisseur uniforme. La cellule est ensuite placée sous une lampe UV afin de polymériser la colle.

1.9 Remplissage

Le remplissage de la cellule se fait par capillarité : la cellule est placée dans une étuve à vide après avoir déposé une goutte de cristal liquide. Le vide étant établi, on chauffe la cellule afin de faire passer le cristal liquide en phase isotrope et en quelques minutes, la cellule est remplie. Cette technique est efficace sur des cellules de petites tailles. Pour des cellules de plus grandes tailles (écrans plats), les forces de capillarités ne sont pas suffisantes et il faut une technique de pressurisation pour le remplissage.

1.10 Insolation sous UV pour le PDLC

Cette étape est caractéristique des PDLC. Pour les systèmes qui utilisent le principe de diffusion, une puissance UV de l'ordre de $1 \text{ mW} / \text{cm}^2$ est utilisée. Pour les cellules à nanogouttelettes, des puissances supérieures à $50 \text{ mW} / \text{cm}^2$ sont nécessaires. L'énergie UV totale dépend de la concentration de monomère dans le mélange initial.

2) Les matériaux

Trois cristaux liquides en phase smectique ont été particulièrement étudiés et utilisés:

FLC : SCE13 Merck
Cristal $>-20^{\circ}\text{C}$ SmC* $60,8^{\circ}\text{C}$ SmA* $86,3^{\circ}\text{C}$ N* $100,8^{\circ}\text{C}$ Isotrope

FLC : CS2005 Chisso Corp. Lixon division
Cristal -19°C SmC* 65°C N* 73°C Isotrope

AFLC: CS4000 Chisso Corp. Lixon division
Cristal -10°C SmCA 82°C SmC* 84°C SmA* 100°C Isotrope

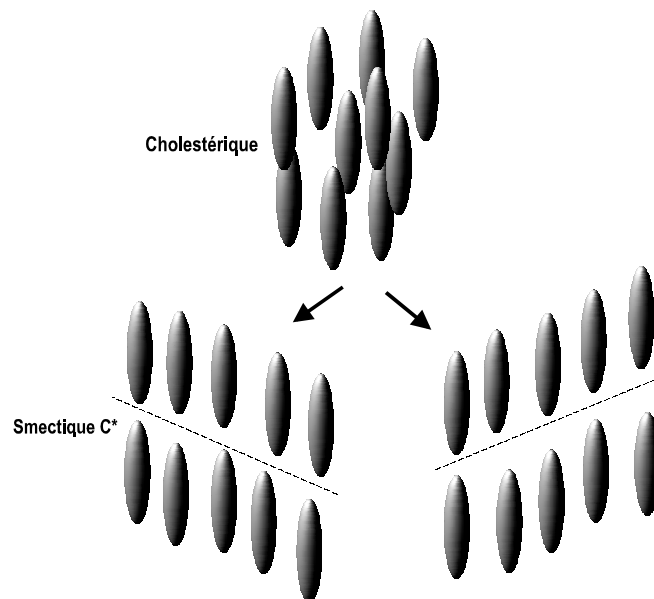
Tous ces produits utilisés sont des mélanges commerciaux. La principale raison de ce choix est la possibilité de travailler à la température ambiante pour simplifier les montages optiques.

2.1 Caractéristiques et structures

Structures uniforme.

Le premier (SCE13) possède un angle d'inclinaison $\theta = 23^{\circ}$ à 25°C . Ce composé est utilisé pour de la modulation d'intensité.

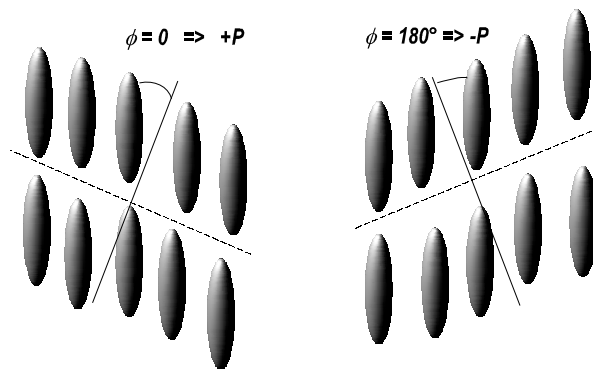
Le deuxième possède un angle d'inclinaison de $\theta = 43^{\circ}$ à 25°C , il est utilisé pour de la modulation binaire de phase. La principale difficulté pour ce cristal liquide est son alignement.



Les deux orientations de couches smectiques

Ce composé présente une transition de phase directe cholestérique – Smectique C* et avec ce type de transition induit deux orientations possibles des couches smectiques d'où une texture avec de nombreux défauts. Sans contrainte externe, ces deux structures sont équiprobables : il y a dégénérescence de ces états.

Cependant, ces deux structures ne sont pas identiques : Elles n'ont pas la même polarisation :



En appliquant un champ électrique de polarité fixe, par couplage avec la polarisation, on va pouvoir favoriser une orientation des couches et lever la dégénérescence.

Un champ électrique d'environ $5V / \mu m$ en continu est appliqué sur la cellule avec une modulation de l'ordre $\pm 2 V / \mu m$ à 50 Hz. Ce traitement électrique est appliqué au passage de la transition Cholestérique – Smectique C^* . Ce traitement sous champ qui privilégie une orientation de couche induit un comportement monostable de la structure.

Structure à hélice (Twist)

Cristaux liquides smectiques avec niveaux de gris. Plusieurs possibilités ont été envisagées telles que le smectique A^* , le smectique C^* avec l'effet « Deformed Helix FLC », le Smectique C^* large tilt avec un enroulement hélicoïdal. C'est ce dernier qui a été particulièrement étudié. Cette solution a été proposée par J.S. Patel, elle consiste à imposer un enroulement hélicoïdal sur un ferroélectrique d'angle d'inclinaison égal à 45° . Pour cela il suffit d'avoir des directions de brossage orthogonales sur chaque substrat. L'application d'un champ électrique déroule l'hélice et induit une orientation uniforme du directeur. Dans cette structure, les problèmes liés à l'orientation des couches smectiques sont identiques à celle de la structure uniforme : le protocole d'alignement est le même que dans le cas de la structure uniforme. Cette structure possède également une réponse électro-optique asymétrique avec une hystérésis. Ce phénomène est d'autant plus marqué que l'épaisseur de la cellule est importante. Contrairement au nématique à hélice, la distribution de l'angle azimutal n'est pas linéaire. Cela est dû à l'apparition de charges d'espace résultant de la non-uniformité de la polarisation dans l'épaisseur de la cellule.

Optiquement, cette structure se comporte comme un biréfringent elliptique dont la matrice de Jones s'écrit sous la forme d'un produit d'une matrice de rotation (pouvoir rotatoire) et d'une matrice d'un biréfringent linéaire:

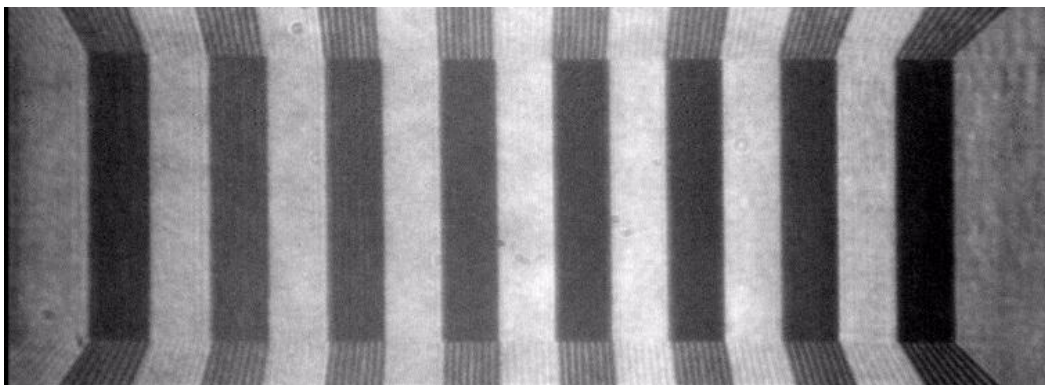
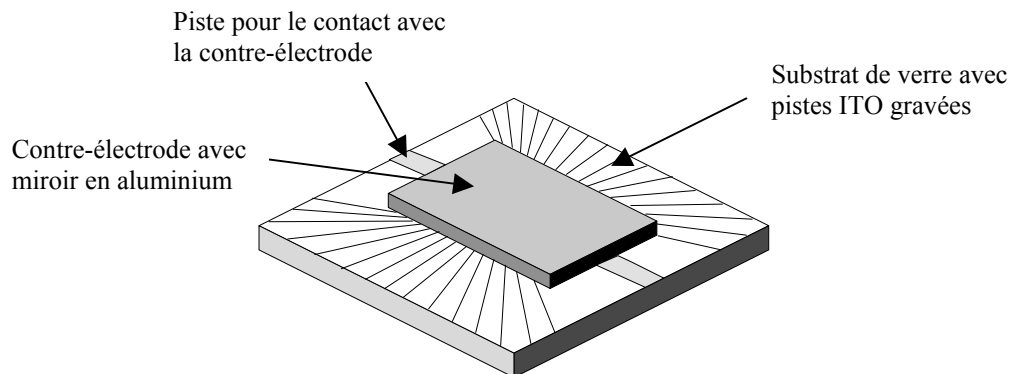
$$\Pi_{tw} = \begin{pmatrix} \cos \Omega & -\sin \Omega \\ \sin \Omega & \cos \Omega \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e^{i\Delta\phi/2} & 0 \\ 0 & e^{-i\Delta\phi/2} \end{pmatrix}$$

Lorsque la structure est étudiée en réflexion, la matrice résultante est celle d'un biréfringent linéaire. Les mesure optiques effectuées en transmission et en réflexion permettent donc de caractériser parfaitement la matrice de Jones globale de la structure.

Les mesures optiques expérimentales ont parfaitement validé le modèle physique pour les cellules de faible épaisseur, par contre des différences notables ont été observées pour les fortes épaisseurs

3) Electrically Addressed Spatial Light Modulator (EASLM)

Ex : barrette diffractive à niveaux de phase binaire $0-\pi$. Plusieurs prototypes différents ont été réalisés avec 128, 256 et 512 pixels. Les verres utilisés sont des verres de 2,2 mm d'épaisseur. La gravure des pistes est faite par la technique : Reactive Ion Etching. Ces barrettes diffractives ont une périodicité de $25\mu\text{m}$: pixel de $22\mu\text{m}$ et inter-pixel de $3\mu\text{m}$. Dans le cas où le cristal liquide se comporte comme une lame demi-onde avec un angle de tilt de 45° , le matériau se comporte comme un déphaseur isotrope binaire $0-\pi$ insensible à l'état de polarisation d'entrée.



Modulateur d'intensité 128 pixels à cristal liquide ferroélectrique (SCE13)

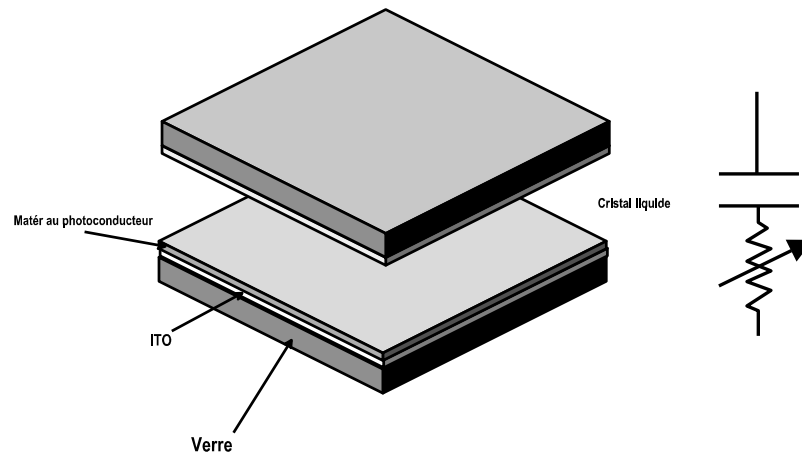
Pour le cristal liquide CS2005, l'épaisseur estimée pour obtenir une lame demi-onde dans le proche infrarouge ($\lambda = 1,55\mu\text{m}$) est $7\mu\text{m}$. Les barrettes travaillant en réflexion, la contre électrode est alors constituée d'un miroir métallique, l'épaisseur du cristal liquide est donc de $3,5\mu\text{m}$.

4) Optically Addressed Spatial Light Modulator (OASLM)

Les modulateurs à adressage optique ont quasiment la même structure que ceux à adressage électrique à la différence près qu'ils possèdent une couche de matériau photoconducteur sur une des électrodes. Cette couche va avoir l'effet d'un diviseur de tension. Les matériaux utilisés sont le silicium amorphe et le Poly-N-vinylcarbazole (PVK). Le PVK est un matériau organique qui a une mobilité des porteurs plus faible, par contre, la mise en œuvre de la couche photoconductrice est beaucoup plus simple. L'application principale de ces modulateurs est la conversion de longueur d'onde, la génération de filtre spatiale par écriture optique, conversion incohérent / cohérent etc.

4.1 Principe de fonctionnement

Une tension est appliquée sur le modulateur et, simultanément, une information par voie optique lui est envoyée. L'intensité optique localement va diminuer la résistance du photoconducteur par création de porteurs libres. Inversement, les zones du photoconducteur non éclairées resteront fortement résistives.



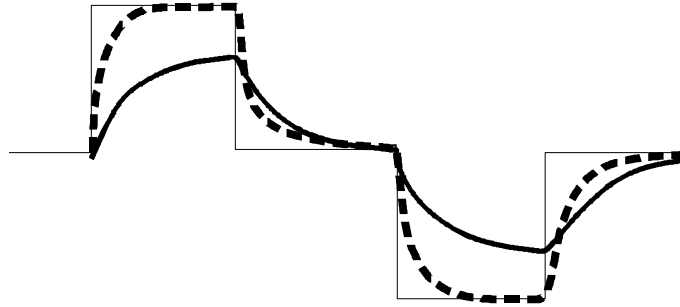
Cellule OASLM et schéma électrique équivalent

De façon très simplifiée, le schéma électrique du circuit est équivalent à un circuit $R(I_{opt})C$. La tension aux bornes du cristal liquide est donc égale à :

$$|U_{lc}| = \frac{|U_0|}{\sqrt{1 + R^2 C^2 \omega^2}}$$

Ce modèle est extrêmement simplifié car il ne tient pas compte de la mobilité des porteurs dans le matériau photoconducteur, de la jonction : conducteur (ITO) / Semiconducteur, de la résistance du cristal liquide, etc.

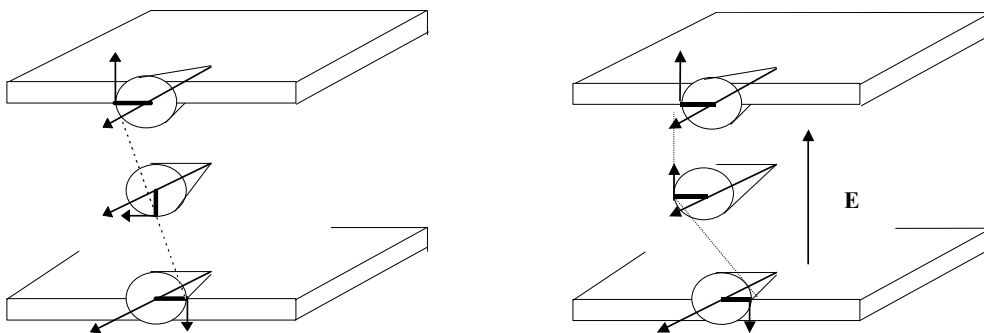
Dans le cas du nématique une simple tension alternative est appliquée sur le modulateur. Pour le ferroélectrique, l'adressage est plus complexe : il s'agit d'impulsions consécutives de signes opposés appliquées sur le modulateur. L'écriture optique, dans ce cas, utilise la variation des temps de montée de l'impulsion de tension aux bornes du cristal liquide en fonction de l'intensité lumineuse.



*Tensions électriques aux bornes du cristal liquide dans le cas d'adressage impulsif.
Avec lumière : trait pointillé, sans lumière : trait plein.*

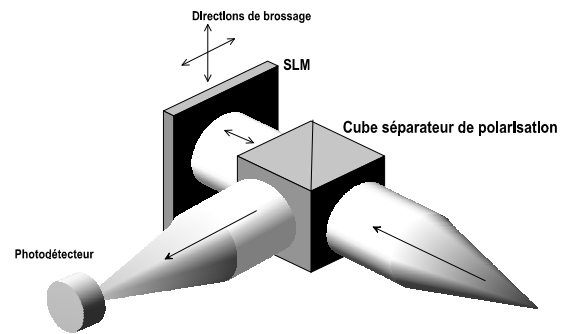
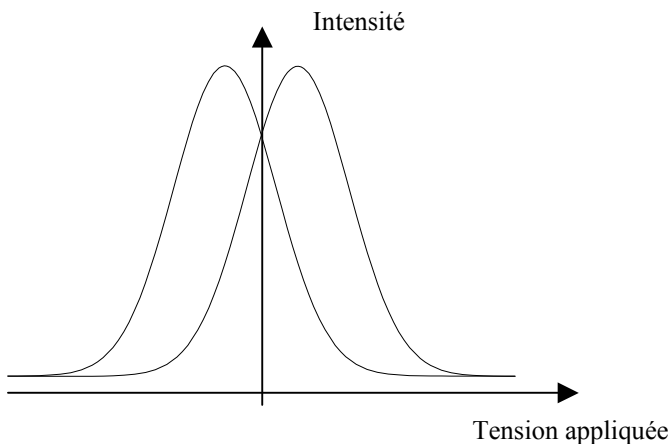
4.2 Le modulateur de lumière à adressage optique à niveaux de gris.

La structure ferroélectrique avec enroulement hélicoïdal est induite par un peignage à 90° sur les deux substrats et un angle de tilt du cristal liquide proche de 45° . L'application d'un champ électrique déroule l'hélice et tend à rendre la structure uniforme :



Effet du champ électrique sur la structure en hélice large tilt

La réponse optique d'une telle structure présente l'avantage d'avoir un comportement optique à peu près symétrique par inversion de la polarité du champ électrique. Une légère hystérésis est également observée.



Réponse optique du Ferroélectrique avec hélice

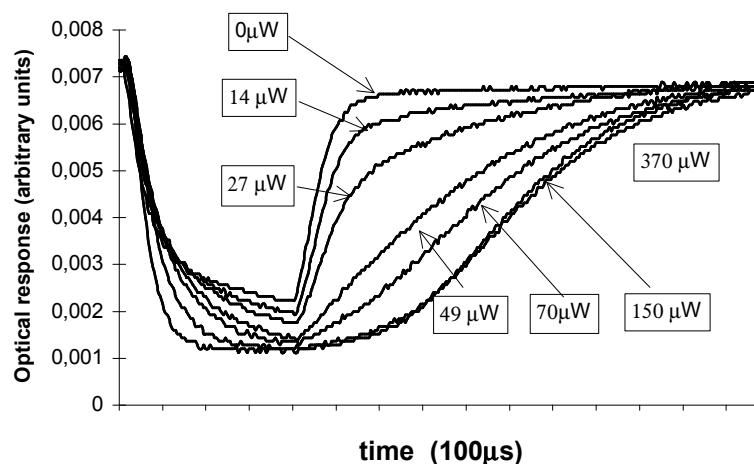
Montage de caractérisation

L'étude polarimétrique de ce matériau a été faite en réflexion et elle a montré qu'il se comporte comme un biréfringent linéaire (sans pouvoir rotatoire). Pour la structure en hélice les axes neutres sont situés approximativement à 45° des directions de peignage. En appliquant un champ, ils tournent de $\pm 45^\circ$ selon la polarité du champ électrique appliqué. Cette structure de ferroélectrique a été étudiée avec des OASLM dont les couches photoconductrices étaient le silicium amorphe et le PVK.

4.3 Le matériau photoconducteur

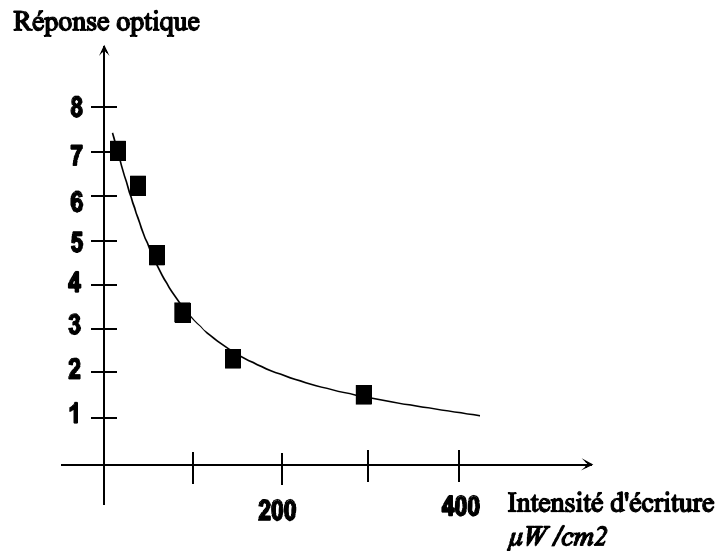
4.3.a Silicium amorphe

La réponse optique du cristal liquide est étudiée en réflexion au travers d'un cube séparateur de polarisation, les axes de peignage coïncident avec l'orientation du cube séparateur. Elle montre l'établissement de niveaux de gris en fonction de l'intensité d'écriture :



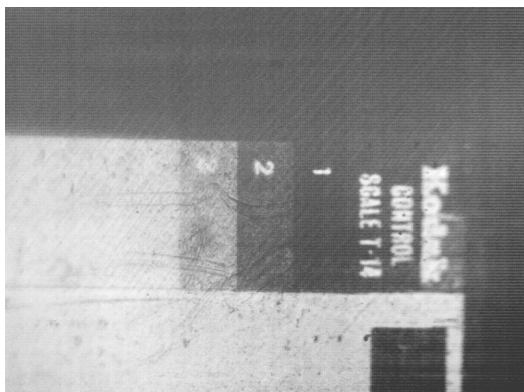
*Réponse optique de l'OASLM pour des impulsions électriques de 10V Durant 400 µs
Les puissances indiquées sont en µW sur un photomètre de 0,5 cm²*

La lecture se fait avec une diode électroluminescente dont l'émission est commandée par un autre générateur d'impulsion asservi au générateur de pilotage de l'OASLM avec un décalage temporel variable. La lecture s'effectue juste après la fin de l'impulsion. En mesurant l'intensité de lecture détectée en fonction de l'intensité d'écriture, la courbe suivante est obtenue :



Intensité de lecture en fonction de l'intensité d'écriture

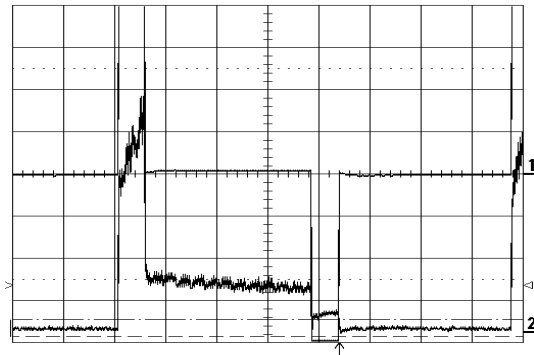
Un système d'imagerie est introduit dans le montage au niveau du faisceau d'écriture. On passe d'une image de lecture positive à une image à lecture négative en tournant de 45° la cellule.



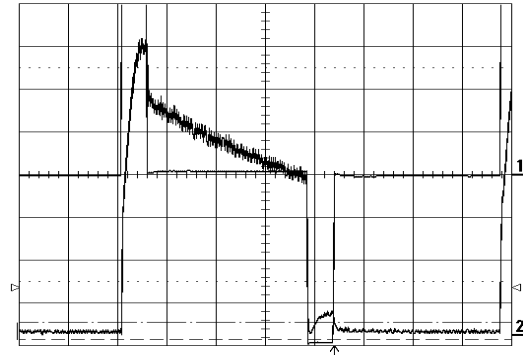
4.3.b Poly-N-vinylcarbazole (PVK)

Des études similaires ont été effectuées en utilisant le Poly-N-vinylcarbazole (PVK) comme couche photoconductrice. L'adressage optique a bien été mis en évidence et il utilise la faible mobilité des porteurs. Lors de l'impulsion, on observe une commutation quel que soit l'éclairement du modulateur dû à un couplage capacitif. Après l'impulsion, la relaxation du cristal liquide est fortement dépendante de l'éclairement. On observe également une forte asymétrie dans la réponse optique qui, n'était pas observée pour le cas du silicium amorphe.

Enfin, on remarque les plus fortes puissances optiques mise en œuvre avec ce type de matériau.



Réponse optique avec 0mW/cm^2 de puissance Impulsion de 5 ms et de 20 V



Réponse optique avec 8mW/cm^2 de puissance Impulsion de 5 ms et de 20 V

Ce type de modulateur répond bien au critère de rapidité : il est possible de changer d'image en moins d'une milliseconde. Par contre son mode de lecture est obligatoirement impulsionnel ce qui entraîne, en moyennant dans le temps, un abaissement de la dynamique de lecture. Dans le cas de l'imagerie infrarouge avec ce modulateur, l'épaisseur des cellules doit être très importante ($>10\ \mu\text{m}$) ce qui apporte des difficultés dans l'alignement du cristal liquide.

Conclusions

La filière technologique « cristaux liquides » développée au département d'optique a rendu possible la conception d'un grand nombre de modulateurs d'amplitude, de phase et de polarisation avec une assez bonne fiabilité et reproductibilité. La flexibilité de cette technologie a permis également une grande diversité quant aux caractéristiques optiques, géométriques, et électriques, ce qui a permis d'utiliser ces composants dans différents systèmes : obturateur, barrette diffractive pour un commutateur optique, OASLM pour la transposition de longueur d'onde ou la conversion incohérent-cohérent.

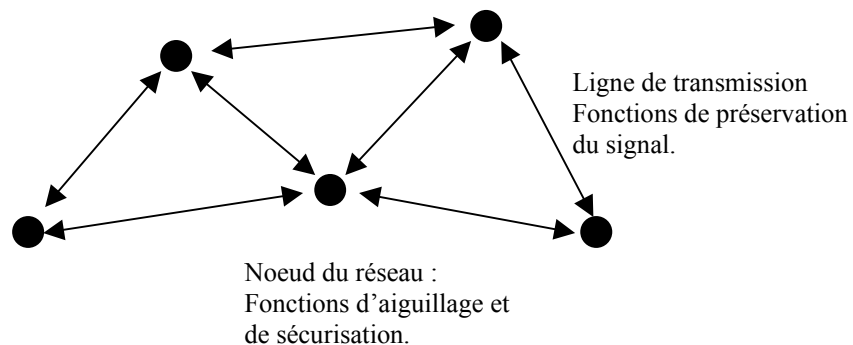
III

Les fonctions pour les télécommunications optiques

1) Les différentes fonctions en télécommunications optiques

La demande en nouvelles fonctions optiques pour les télécommunications ne cesse de croître. Les raisons de cet état de fait sont multiples. La plus visible est l'augmentation de la quantité d'informations véhiculées dans la fibre, supportée à la fois par le débit numérique et le nombre de longueurs d'onde (canaux), qui demande de plus en plus de fonctions et de techniques optiques pour améliorer et fiabiliser la propagation de l'information dans les fibres.

D'autre part, la complexité des réseaux « haut débit » induit de plus en plus de nœuds d'interconnexion qui aiguillent les informations vers les bonnes directions. Actuellement, ces nœuds de répartition de l'information (stations) utilisent exclusivement l'électronique qui a un coût assez élevé du fait de la conversion : optique \leftrightarrow électronique (transpondeur), et qui n'est pas forcément bien adaptée au réseau optique « haut débit » vu que dans bien des cas, il suffit de gérer le trafic de longueurs d'onde pour reconfigurer ou restaurer un réseau.



Réseau optique constitué de lignes de transmission interconnectées par des nœuds

Les fonctions optiques pour les télécommunications peuvent se classer en trois groupes :

- Les fonctions optiques élémentaires : celles-ci agissent sur les propriétés intrinsèques du mode optique qui se propage dans la fibre. Elles sont utilisées à la fois dans les fonctions optiques pour la transmission et les fonctions évoluées.
- Les fonctions optiques pour la transmission. Elles permettent de garantir la qualité de la transmission. Elles gèrent par exemple la compensation des différentes dispersions : chromatique, modale de polarisation (PMD). Elles gèrent également l'égalisation du gain des amplificateurs optiques sur les différentes longueurs d'onde etc.
- Les fonctions dites « évoluées ». Elles gèrent les nœuds d'interconnexion du réseau en permettant par exemple le routage spatial et/ou spectral de l'information optique pour la restauration et reconfiguration du réseau.

PMD : Polarisation Mode Dispersion

1.1) Fonctions optiques élémentaires

Ces fonctions forment un ensemble de base et elles peuvent être utilisées, combinées afin de créer des fonctions plus complexes et bien adaptées aux besoins des télécommunications optiques.

Ces fonctions agissent sur certaines propriétés de la lumière ou sur plusieurs simultanément. Les principales caractéristiques physiques du signal optique sont définies ci-dessous de façon exhaustive avec les composants standards agissant sur ces caractéristiques:

- Amplitude : atténuateur optique, amplificateur.
- Polarisation : contrôleur de polarisation.
- Géométrie du mode : élargissement du mode (Tapper), fibre lentillée (Gradissimo Expansimo), interférences multimodales (coupleur MMI).
- Spectrale : effets non-linéaires (conversion de longueur d'onde).
- Phase : lignes à retard (interféromètre MZ).
- Vecteur d'onde k : réseau de diffraction : (multiplexeur)

Il existe une grande variété d'effets électro-optiques, de matériaux et de technologies pour réaliser les fonctions optiques. L'aboutissement industriel dépend de différents critères techniques : caractéristiques optiques intrinsèques, temps de réponse, de maturité technologique, de fiabilité, de simplicité de mise en œuvre mais également de critères industriels spécifiques au marché des télécommunications : compacité, coût, consommation électrique, adaptation aux normes en vigueur dans les télécommunications, etc

Ces fonctions élémentaires et les technologies associées sont présentées dans les tableaux suivants :

MMI : Multi Mode Interference

MZ : Mach-Zehnder

Les effets électro-optiques et les fonctions optiques élémentaires

EFFET OPTIQUE	CARACTERISTIQUES MODIFIEES	FONCTIONS / COMPOSANTS	TYPE DE MATERIAUX
Electro-optique (1)	Polarisation / Phase	Déphaseur Modification de la polarisation / Modulateur MZ	LiNbO ₃ , AsGa, BSO, PLZT, PZT, polymère, Cristal liquide nano-PDLC, H-PDLC
Electro - mécanique	Amplitude, vecteur d'onde	Déflexion / MEMS	Silicium
Electro - absorption	Amplitude	Atténuateur Modulateur rapide	Effet Franz-Keldysh Multi-puits quantiques
Acousto - optique	Vecteur d'onde	Déflexion / convertisseur de polarisation	Idem (1)
Thermo - optique	phase	Déphaseur / Switch MZ	Polymère
Magnéto-optique	Polarisation	Modification de la polarisation Circulateur / Isolateur (composant Passif)	YIG (Y ₃ F ₅ O ₁₂)
Electro-optique	Polarisation	Contrôleur de polarisation	LiNbO ₃ , PLZT, Cristal liquide
Double réfraction	Polarisation	Déflexion/ Séparation de polarisations	Idem (1)
Réflexion	Vecteur d'onde, Amplitude	Déflexion	MEMS, Techno. bulles
Réfraction	Vecteur d'onde	Déflexion	Idem (1)
Diffraction	Vecteur d'onde	Déflexion → routage (spectral)	Idem (1)
Diffusion	Vecteur d'onde + Amplitude	Atténuation	PDLC
Effet non linéaire	Spectrale	Conversion de longueur d'onde	Matériaux centro-symétriques (Effet Kerr)
Emission stimulée	Amplitude	Amplification /conversion de longueur d'onde	Semi-conducteur, Silice + Erbium,
Photo-réfractif	Phase, vecteur d'onde	Déflexion → routage spectral	Idem (1)

Effets interférométriques :

EFFET OPTIQUE	FONCTIONS	TECHNOLOGIE / TYPES DE MATERIAUX
Interférences multiples	Filtre de Bragg : routage spectral	Planaire, fibre Polymère, Si-SiO ₂
//	Filtre Fabry-Perot : routage spectral	Planaire, fibre
//	Résonateur en Anneau : routage spectral	Planaire, fibre Polymère, Si-SiO ₂
//	Cristaux photoniques : routage spectral	Espace libre, planaire
Interférence à deux ondes	Mach-Zehnder/Michelson Routage spatial	Planaire, fibre Polymère, Si-SiO ₂ Semi-conducteur
Imagerie multiple	AWG	Planaire
Interférences inter-modales	Interference Multi-mode MMI Routage spatial	Planaire
Interférence entre 2 modes couplés	Coupleur routage spatial	Fibre, planaire

Caractéristiques optiques des différents matériaux :

TYPES DE MATERIAUX	ATTENUATION (DB / CM)	MODULATION %	FREQUENCE MAX
LiNbO ₃	0,5	0,5	40 GHz
AsGa	0,5	14	20 GHz
InP	3	3	40 GHz
Cristaux liquides	1 -10	10 - 20	0,1 KHz -100 KHz
Polymères : acrylate, polyimide	0,1	35	100 GHz (électro-optique) 1 KHz (Thermo-optique)
SiO ₂	0,1	1,5	Thermo-optique 1 KHz
Si ₃ N ₄	0,1	30	Thermo-optique 1 KHz

1.2) Les fonctions régénération et compensation.

L'information envoyée sous forme d'impulsions optiques doit être détectée en bout de transmission avec la meilleure qualité possible : il faut préserver l'intégrité du signal sur la distance de transport \Rightarrow Les propriétés basiques (spatiales et temporelles) du mode qui véhicule le signal doivent être également préservées :

- Compensation de dispersion chromatique
- Compensation de Dispersion Modale de Polarisation
- Egalisation de gain des amplificateurs optiques
- Egalisation de canaux (longueurs d'onde)

Phénomènes intrinsèques à la propagation du mode dans la fibre :

Nature du phénomène	Conséquences	Types de compensation
<p>Absorption Typique : 0.2 dB / km</p> <p>Dispersion chromatique Indice de la fibre dépendant de la longueur d'onde.</p> <p>Dispersion modale de polarisation. Biréfringence induite dans la fibre.</p> <p>Effets non-linéaires</p>	<p>Amplitude décroissante au cours de la propagation.</p> <p>Elargissement temporel des impulsions.</p> <ul style="list-style-type: none"> • 1^oordre : Dédoublment des impulsions. • 2^oordre : Elargissement temporel des impulsions et distorsions de l'enveloppe des impulsions. <ul style="list-style-type: none"> • Elargissement des impulsions /gigue • Diaphotie entre canaux (mélange 4 ondes) 	<p>Amplificateur optique (Erbium, Raman).</p> <ul style="list-style-type: none"> • Fibre dispersion décalée. • Fibre de compensation. • Réseau de Bragg à pas variable <p>Compensateur dynamique de polarisation.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Filtre électronique • Compensateur optique <p>Compensation statique (Fibres à cœur étendu)</p>

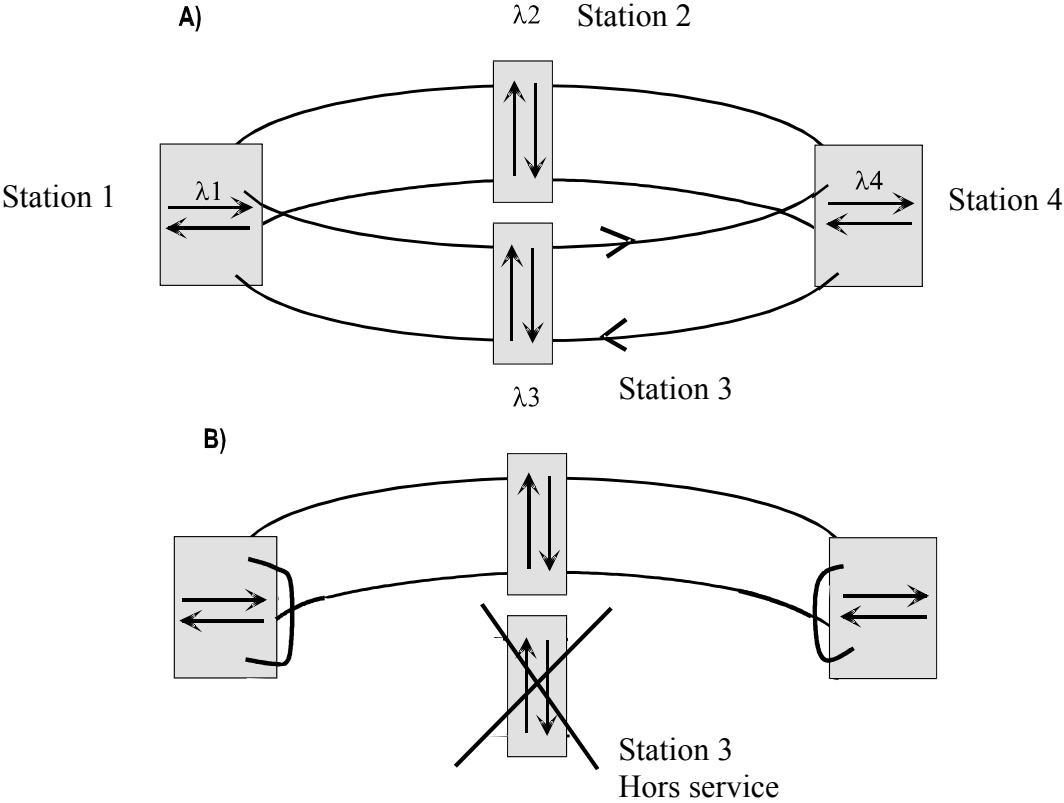
1.3) Les fonctions évoluées (systèmes) :

Elles sont essentiellement associées au routage et à la sécurisation de réseau. Elles permettent de gérer les différents canaux de transmission afin d'acheminer l'information à l'endroit voulu, de protéger le réseau etc. On peut citer quelques unes de ces fonctions :

- Multiplexeur optique à insertion /extraction (MIE / OADM)
- Commutateur optique (optical cross connect)
- Routeur en longueur d'onde (lambda router)

MIE : Multiplexeur Insertion Extraction
OADM Optical Add Drop Multiplexer

Ex : La gestion du trafic sur un multiplex de longueurs d'onde se fait par l'intermédiaire de stations à insertion /extraction (A). L'anneau est doublé afin de sécuriser et de reconfigurer le réseau en cas de défaillance d'une station (B).



2) Les caractéristiques des composants optiques passifs et les critères de choix.

Introduction

Une fois qu'une fonction optique pour les télécommunications est identifiée, dans bien des cas, il est extrêmement difficile de prévoir quelle sera l'architecture et la technologie qui répondront à la plupart des critères exigés, qu'ils soient techniques, industriels ou économiques. Cependant, il existe certains critères qui permettent d'effectuer une pré-sélection :

Concernant les matériaux, c'est le temps de réponse exigé du composant qui permet de choisir rapidement. Pour la technologie (espace libre ou optique intégrée), c'est le nombre de canaux à gérer qui sera un des critères pertinents. Il existe bien d'autres critères, mais qui eux, sont beaucoup moins bloquant.

Il existe également des contraintes en fiabilité incontournables et des normes (telcordia, ITU) qui standardisent les produits destinés aux télécommunications et qui garantissent la qualité, la fiabilité et la fonctionnalité du composant.

L'espace d'utilisation du cristal liquide pour des composants en télécommunications est délimité avant tout par les temps de réponse. Il est facile de constater que cet espace est assez restreint en regardant les différents temps caractéristiques des télécommunications. Les performances attendues de ces composants permettent également d'avoir un cadre particulièrement bien défini pour le choix des technologies.

2.1) Quelques caractéristiques en télécommunications optiques

2.1.a Temps caractéristiques physiques : la transmission du signal est soumise à certaines perturbations (phénomènes temporels) susceptibles de dégrader la qualité du signal. Chacun de ces phénomènes est associé à une constante de temps qui la caractérise.

1. La Dispersion Modale de polarisation (PMD) est la conséquence de contraintes mécaniques (vibrations) qui induisent de la biréfringence dans la fibre. Phénoménologiquement, cela se traduit par un dédoublement de l'impulsion. Ces deux impulsions résultantes sont associées à deux états de polarisations orthogonaux. La vitesse d'évolution des états de polarisation peut atteindre 300 rad/s sur la sphère de Poincaré.
2. L'insertion et l'extraction de longueurs d'onde génèrent des régimes transitoires de gain des amplificateurs optiques à fibre dopée assez perturbants pour la qualité du signal. Ces régimes transitoires ont des constantes de temps de l'ordre de la désexcitation par émission stimulée :

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_{sp}} + \frac{1}{\tau_{st}} \quad \text{avec} \quad \frac{1}{\tau_{st}} = \sigma \phi \quad \text{et} \quad \sigma : \text{section efficace} \quad \phi : \text{flux optique}$$

Temps de fluorescence du niveau métastable :

- Durée de vie du niveau métastable Er^{3+} : $\tau_{sp} = 10 \text{ ms}$
- Durée de vie du niveau métastable Pr^{3+} : $\tau_{sp} = 110 \mu\text{s}$

2.1.b Temps caractéristiques « système »

Il existe plusieurs temps caractéristiques pour les télécommunications. Les temps caractéristiques sont des temps indicatifs qui ne tiennent pas compte du format de modulation.
Ex : Temps système caractéristiques. Réseau à 10 Gb/s.

1. Temps bit : 100ps
2. Temps de paquet (53 octets pour l'ATM) : 10 ns
3. Temps conteneur (STM 64) : 125 μ s
4. Temps de reconfiguration d'un réseau (SDH) : 50 ms

2.1.c Les caractéristiques optiques pour les composants

Les performances standards des composants optiques sont caractérisées par plusieurs paramètres dont les principaux sont:

1. Perte d'insertion (dB)
2. Pertes dépendantes de la polarisation (PDL ; dB)
3. Différence des temps de groupe (DGD ; ps) pour la dispersion modale de polarisation (PMD)
4. Diaphotie (dB)
5. Dispersion chromatique(ps)
6. Temps de réponse

Au vu de ces différentes caractéristiques, on peut constater que le cristal liquide peut aisément trouver sa place dans des fonctions de compensation pour les transmissions et des fonctions de sécurisation ou de reconfiguration.

3) Le matériau : cristal liquide

Le champ applicatif de ce matériau a été longtemps restreint aux écrans plats. Diverses études ont tenté de l'introduire dans d'autres applications telles que des modulateurs spatiaux de lumière pour le traitement optique du signal, élément diffractif reconfigurable, imagerie infrarouge, mais les débouchés industriels sont restés marginaux dans la plupart des cas. On a constaté récemment un nouvel intérêt pour le cristal liquide dans le secteur des télécommunications optiques pour certains types de fonction. Les raisons sont multiples: limitation fonctionnelle des autres technologies et également leurs coûts, nouvelles structures à cristaux liquides bien adaptées à la problématique des télécommunications.

Le cristal liquide, dans une configuration appropriée et de par ses propriétés intrinsèques optiques et électro-optiques, peut en effet, réaliser à peu près toutes les fonctions optiques (élémentaires ou évoluées). C'est son temps de réponse, relativement lent, qui le limite principalement. Le cristal liquide ne possède pas d'effet chromatique intrinsèque tout au moins sur le spectre du WDM, il est parfaitement transparent dans le proche infrarouge, il possède une importante modulation d'indice ($\Delta n \approx 0,1 - 0,3$ dans l'infrarouge).

Ce matériau qu'il soit nématique ou smectique est très fiable dans le temps. Il y a peu de dégradation des composés commercialisés, cela est essentiellement dû à la fois à leur stabilité et leur haute pureté chimique. Le principal handicap est le temps de réponse (SmA^* : $1\mu s$, SmC^* : $10\mu s$, N : $10ms$ nano-PDLC : $50\mu s$) qui va limiter considérablement le champ d'application à certaines fonctions de routage de sécurisation et de compensation.

Ces matériaux peuvent également se mettre dans de nombreuses géométries et ils présentent une bonne compatibilité avec différents substrats (métal, semi-conducteur, polymère etc.).

Cela permet une grande souplesse technologique et donc potentiellement, cela permet d'obtenir une technologie « bas coût ».

4) Les fonctions optiques avec les cristaux liquides

4.1) Fonctions élémentaires

Trois fonctions élémentaires seront présentées comme représentatives des possibilités du cristal liquide : le contrôle de l'amplitude, de la phase et de la polarisation. Parmi ces trois fonctions, le contrôle de la polarisation sera particulièrement détaillé de par sa complexité et aussi du fait qu'elle fait actuellement l'objet d'une étude approfondie dans le cadre d'un contrat RNRT qui doit déboucher sur un contrat européen. Les autres caractéristiques sont plus difficilement accessibles ou alors sont la combinaison de ces fonctions élémentaires.

4.1.a) Modulation d'amplitude

Avec contrôle de la polarisation : a priori tout cristal liquide avec un polariseur permet la modulation d'amplitude. Sans contrôle de la polarisation. Un système composite (PDLC), par contrôle de la diffusion, module l'amplitude. L'insensibilité à la polarisation est faite si le nombre de gouttelettes de cristal liquide que voit le faisceau est suffisamment important pour assurer un effet statistique.

Dans le cadre de la problématique des télécommunications, l'insensibilité à la polarisation est déterminante. Avec ce type de composant, la compacité et le bas coût sont des arguments déterminants. La solution PDLC confiné dans une structure de connectique pour fibre standardisée semble être la solution la plus intéressante.

4.1.b) Modulation de phase isotrope

Cette fonction est très utile dans les systèmes interférométriques à deux ondes ou à ondes multiples (Mach-Zehnder, Michelson, Fabry-Pérot, Bragg, MMI, réseau de diffraction, etc.).

Avec contrôle de la polarisation :

- Analogique avec une cellule nématique orientée à biréfringence variable et polarisation linéaire orientée selon l'axe optique.
- Analogique avec SmA* (lame $\lambda / 2$) et polarisation circulaire.

Sans contrôle de la polarisation :

- Le nano-PDLC.
- Binaire avec le cristal liquide ferroélectrique à angle de rotation de 90°.

4.1.c) Contrôle de la polarisation

Le contrôle de la polarisation est, des trois fonctions élémentaires, la plus compliquée à réaliser. Cette fonction est en effet assortie de deux conditions très importantes :

- 1) permettre toutes transformations d'état de polarisations
- 2) avoir le contrôle sans fin. Cette dernière condition signifie que lors de l'évolution d'état de polarisation d'entrée, la transformation s'effectue sans discontinuité de l'état du contrôleur.

La première est une condition somme toute assez triviale. La seconde est extrêmement exigeante en terme d'architecture et d'algorithme de pilotage associé.

La modification de l'état de polarisation est faite par un ensemble de lames à biréfringence variable (axes ou différence d'indice variables). Tous cristaux liquides permettent a priori de générer cette fonction en adaptant leur structure. Le contrôleur possède fondamentalement deux degrés de liberté : il existe une rotation qui permet de passer d'un état de polarisation à un autre (angle de rotation + position de l'axe de rotation). Par conséquent une lame d'axe orientable et à déphasage variable ($0-2\pi$) suffit pour la transformation de l'état de polarisation. Cependant la condition du contrôle sans fin n'est pas vérifiée car on est limité en déphasage. Pour l'obtenir, il existe plusieurs tactiques : prendre un contrôleur qui possède intrinsèquement le contrôle sans fin, ou alors augmenter le nombre de degrés de liberté (nombre de lames) avec un algorithme de pilotage adapté. Pour la deuxième solution, il est souvent très difficile de valider cette propriété sans faire appel à des simulations. Commençons par étudier les différentes catégories de contrôleur de polarisation.

4.3 Les différentes structures de lames pour le contrôleur de polarisation

Δn variable : trois cellules ($0-2\pi$) à 45° l'une de l'autre sont indispensables.

- Nématique : le cristal liquide est aligné sur un axe par peignage, le champ électrique est perpendiculaire aux substrats.
- Electroclinique : le cristal liquide est orienté homéotrope. L'application d'un champ électrique dans le plan des couches induit de la biréfringence. La lumière se propage parallèlement à la normale aux couches, la polarisation est orthogonale au champ électrique.
- Nano PDLC : la géométrie des champs est similaire à celle de l'électroclinique.

Axe variable :

- Cristaux liquides smectiques en géométrie planaire (rotation limitée à deux fois l'angle de tilt et champ perpendiculaire aux substrats).
- Cristaux liquides smectiques en géométrie homéotrope (rotation illimitée et champ parallèle aux substrats).
- Nématique en géométrie homéotrope avec champ électrique dans le plan du substrat.

Axe variable et Δn variable :

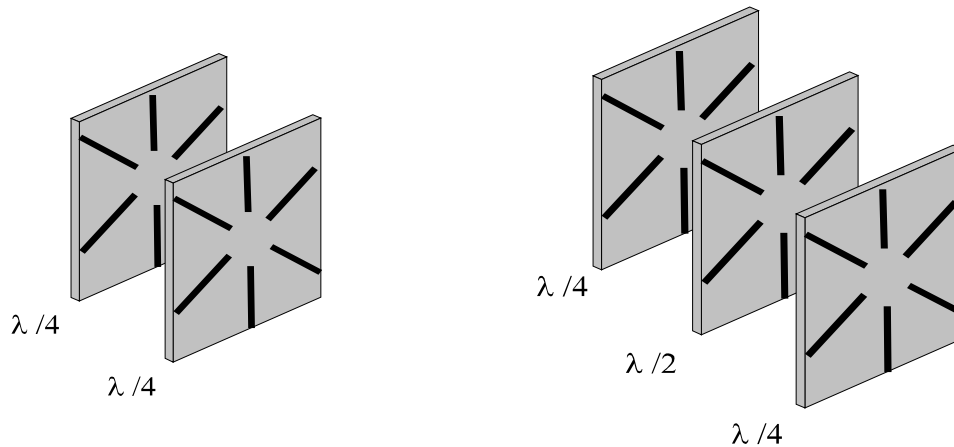
Cristaux liquides à réponse analogique et à champ tournant (système d'électrodes dans le plan de substrat induisant un champ électrique rotatif).

- Nano-PDLC
- SmA* (homéotrope)
- Nématique (homéotrope)

4.4 Les différentes architectures pour le contrôleur de polarisation

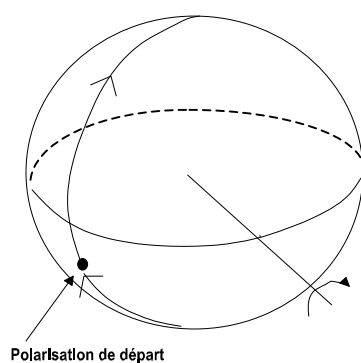
Pour réaliser la transformation des états de polarisations, les solutions retenues sont un compromis entre les contraintes technologiques et d'algorithmique. Les différentes solutions envisagées sont les suivantes

1. 1 lame avec axe et biréfringence variable ($0-2\pi$)
2. 2 lames $\lambda/4$ à axes variables
3. 2 lames $\lambda/4$ et une lame $\lambda/2$
4. 2 lames avec axe et biréfringence variable ($0-\pi$)

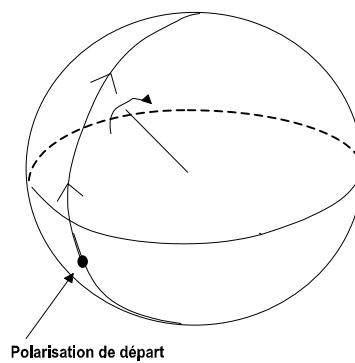


Architectures types de contrôleurs de polarisation

1) Configuration 1 lame. Pour des raisons de contrôle sans fin la première solution ne peut être retenue car elle ne permet que très difficilement le contrôle sans fin : dans le cas de figure où le contrôleur doit générer un déphasage de 2π afin d'effectuer la bonne transformation puis doit aller au-delà, il existe une procédure pour continuer à suivre l'évolution. En remarquant que la lame dans ce cas est une lame λ , il est possible de la tourner sans qu'il y ait de modification de l'état de polarisation de sortie.

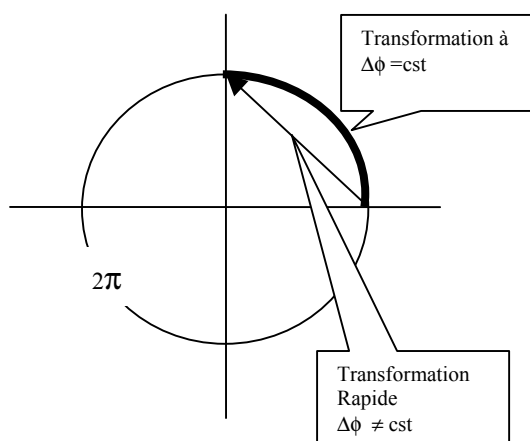


Transformation avec augmentation de la biréfringence



Transformation avec rotation de 180° de la lame et diminution de la biréfringence

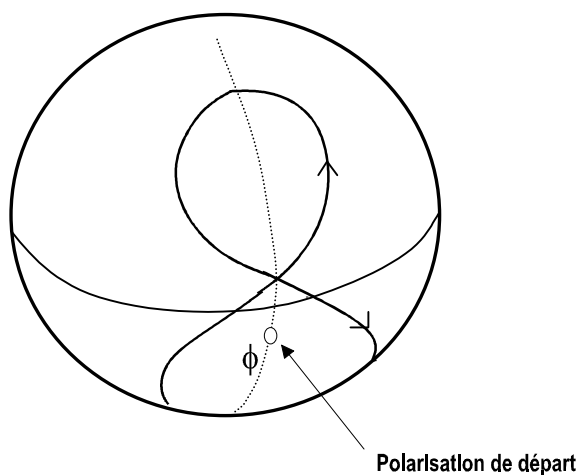
Par conséquent, une rotation de la lame de 180° sur la sphère de Poincaré, associée à une diminution de la biréfringence, permet de continuer le suivi de l'état de polarisation. Cette procédure est facilement gérable par un algorithme, cependant, il est quasiment impossible de tourner rapidement de 180° sur la sphère de Poincaré tout en garantissant le déphasage de 2π , avec un cristal liquide à biréfringence variable. Garantir la lame « onde » revient à faire tourner le cristal liquide en faisant tourner le champ électrique par incrémentation (trait épais). Par contre une rotation brutale du champ électrique entraîne une modification de la biréfringence effective de la lame.



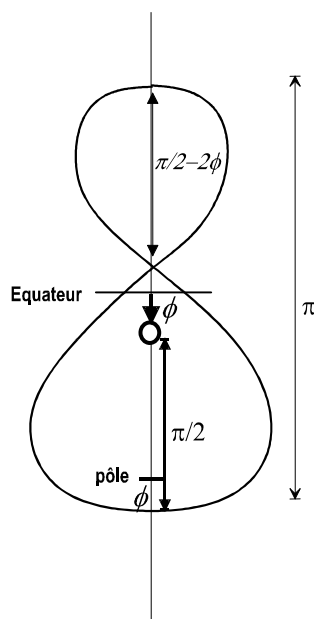
Transformation de l'état de la lame biréfringente au cours de la procédure de retournement en coordonnées polaires : $\Delta\phi$, orientation de la lame.

2) Configuration à 2 lames $\lambda/4$

La lame $\lambda/4$ transforme un état de polarisation d'ellipticité ϕ en un ensemble de polarisations par rotation. Cet ensemble de points possède un recouplement lorsque l'ellipticité est inférieure à 45° . Dans le cas de la lame $\lambda/4$ l'amplitude de variation verticale des états de polarisation est de π (deux fois le déphasage de la lame). Cette information se généralise pour n'importe quelle lame biréfringente : l'amplitude verticale de cet ensemble d'état de polarisation donne deux fois le déphasage de la lame.

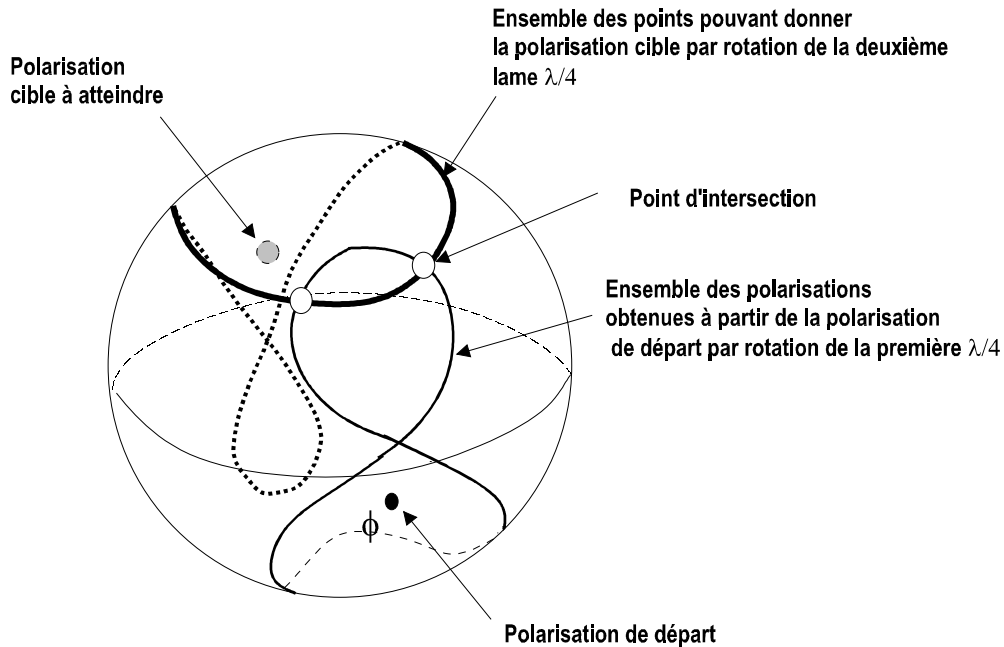


Ensemble des états de polarisation obtenus par rotation d'une lame $\lambda/4$.



Caractéristiques géométriques de cet ensemble de polarisations.

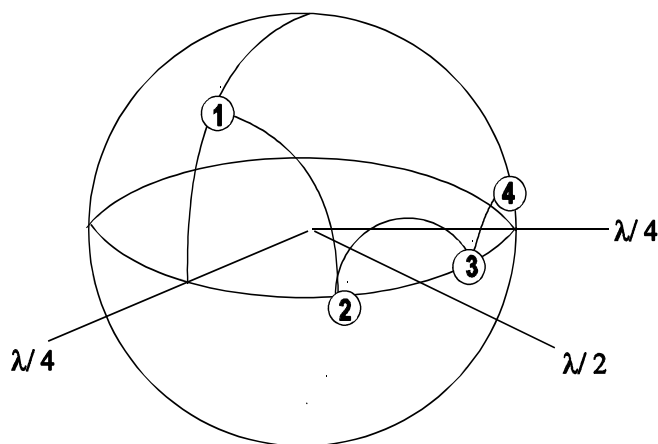
Le positionnement des lames biréfringentes ne résulte pas d'une construction géométrique triviale. En prenant l'intersection des polarisations obtenues par la première lame et des polarisations qui donnent la polarisation cible, il est facile de voir qu'il existe toujours des états du contrôleur de polarisation qui effectuent la bonne transformation. Ces polarisations intermédiaires peuvent se construire facilement par géométrie. Elles sont au nombre de deux :



Cette configuration à deux lames pose un problème important pour le pilotage des lames $\lambda/4$: des états de polarisation antipodaux (polarisation de départ et polarisation cible) peuvent engendrer des discontinuités dans la position des lames biréfringentes et donc une instabilité du contrôleur (rotation brutale de 90° des axes neutres d'une lame biréfringente lors de fluctuations d'un des états de polarisation autour de la position antipodale).

3) Configuration à 3 lames.

Le mécanisme de positionnement des lames est dans ce cas trivial :



Avec cet algorithme de transformation, la lame $\lambda/2$ prend en charge l'orientation de la polarisation et la dernière lame $\lambda/4$, l'ellipticité.

Obtenir des lames demi-onde peut poser problème du fait de l'épaisseur importante. Une variante consistant en un assemblage de 4 lames $\lambda/4$ revient au système précédent, puisque les deux lames intermédiaires sont couplées et forment une lame $\lambda/2$.

4) Configuration 2 lames à biréfringence variable et axe tournant

L'amplitude de variation du déphasage de chaque lame doit être de $0-\pi$. Avec cette architecture, il est possible de transformer tout état de polarisation en n'importe quel autre. Le contrôle sans fin est obtenu par l'algorithme qui évite une augmentation trop importante de la biréfringence d'une des lames, ce qui entraînerait une situation de blocage : dès qu'une lame voit sa biréfringence augmenter trop fortement, on diminue celle-ci tout en jouant sur la biréfringence de l'autre.

4.5 Choix des matériaux

Pour les systèmes de contrôle de polarisation qui demandent une biréfringence variable en cours de fonctionnement, la phase SA* et le nano-PDLC sont naturellement les mieux adaptés. Pour les contrôleurs à biréfringence fixe, le smectique C* convient particulièrement. Ce matériau présente l'avantage d'avoir de la biréfringence spontanée, ce qui doit limiter la consommation électrique du composant, par contre obtenir des lames $\lambda/2$ et $\lambda/4$ demande une grande précision dans l'épaisseur des lames. Un récapitulatif des avantages et des inconvénients des différents matériaux est présenté dans le tableau ci-dessous :

Cristaux liquides	Effet E.O.	Caractéristiques	Technologie
Smectique A*	Effet électroclinique Soft mode	Axe et biréfringence variables + Rapide : 10 μ s -Comportement très sensible à la température	- Manque de produits commerciaux - Nécessite un champ électrique intense et homogène dans l'épaisseur
Smectique C*	Couplage Ferroélectrique «Mode de Goldstone »	Axe variable Rapide : 30 μ s L'état du cristal liquide se maintient sans champ électrique appliqué.	Alignement homéotrope compliqué. Grande précision sur l'épaisseur des cellules.
Anti-ferroélectrique	(Voir chapitre 4)	Axe et biréfringence variable	Alignement homéotrope excellent
Nano-PDLC	Couplage diélectrique	+ Rapide : 50 μ s Axe et biréfringence variable	+ Mise en œuvre facile. + Structure stabilisée. - Champ électrique élevé

Selon le type de cristal liquide utilisé, les cellules ont des épaisseurs comprises entre quelques microns et quelques dizaines de microns.

2 types de système d'électrodes ont été développés avec des designs similaires :

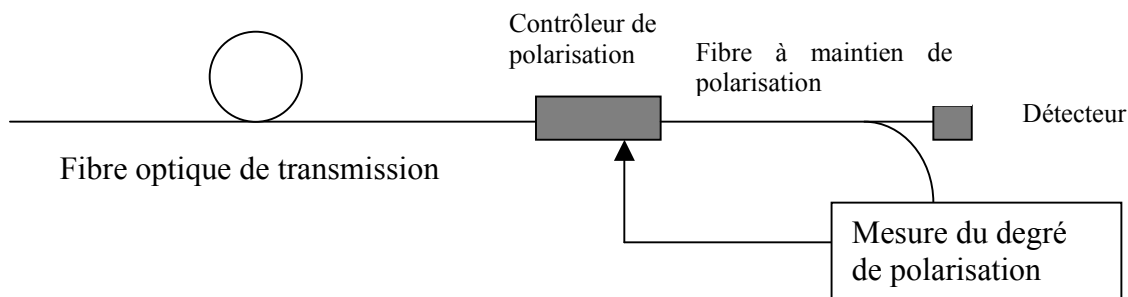
1. Electrodes fines (ITO) obtenues par photolithographie et gravure RIE
2. Electrodes épaisses (Cu) obtenues avec la technologie LIGA dont l'étape clé est la croissance électrolytique des électrodes de cuivre.

Ces dernières électrodes sont particulièrement bien adaptées au nano-PDLC. Par contre l'orientation des couches smectiques est, a priori, particulièrement délicate avec ce type d'électrode, car la couche de surfactant est susceptible de se déposer sur tout le substrat (également sur les flancs des électrodes) : il en résulte une situation conflictuelle et la création de nombreux défauts le long des électrodes et en particulier dans la zone active de la cellule.

4.6) Fonctions de compensation

4.6.a Compensation de PMD au premier ordre

Au cours de la transmission, les impulsions optiques sont dédoublées sur deux états de polarisation : c'est la dispersion modale de polarisation (PMD). Pour compenser cette dispersion, on insère entre la fibre de transmission et le photo-détecteur un contrôleur de polarisation et une fibre à maintien de polarisation. La mesure du degré de polarisation quantifie l'importance de la PMD et c'est ce paramètre qu'il faut optimiser en modifiant le contrôleur de polarisation.



Principe de la compensation de PMD

Les caractéristiques du contrôleur de polarisation sont les suivantes :

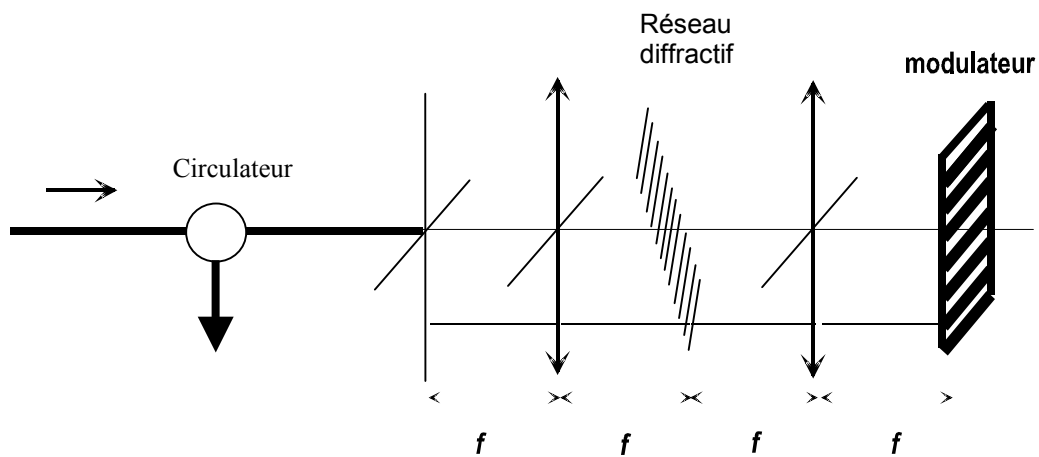
- Contrôle sans fin.
- Temps de réponse typique 10 μ s.

La définition du temps de réponse est : le temps que met le cristal liquide pour effectuer une rotation élémentaire incrémentation (en angle ou en déphasage). Ce temps de réponse dépend principalement des caractéristiques temporelles d'évolution de la PMD, mais également, il dépend de la structure de l'algorithme : nombre d'essais à effectuer pour trouver le bon état. L'amplitude de l'incrémentation est plutôt liée à la qualité maximale de la transmission que l'on souhaite obtenir.

C. Francia, F. Bruyère, J-P. Thiery and D. Pennickx, "Simple dynamic polarization mode dispersion compensator", Electronics Letters Vol.5 No.5 pp.414 - 415 (1999)

4.6.b Egalisation dynamique de gain /Egalisation dynamique de canaux

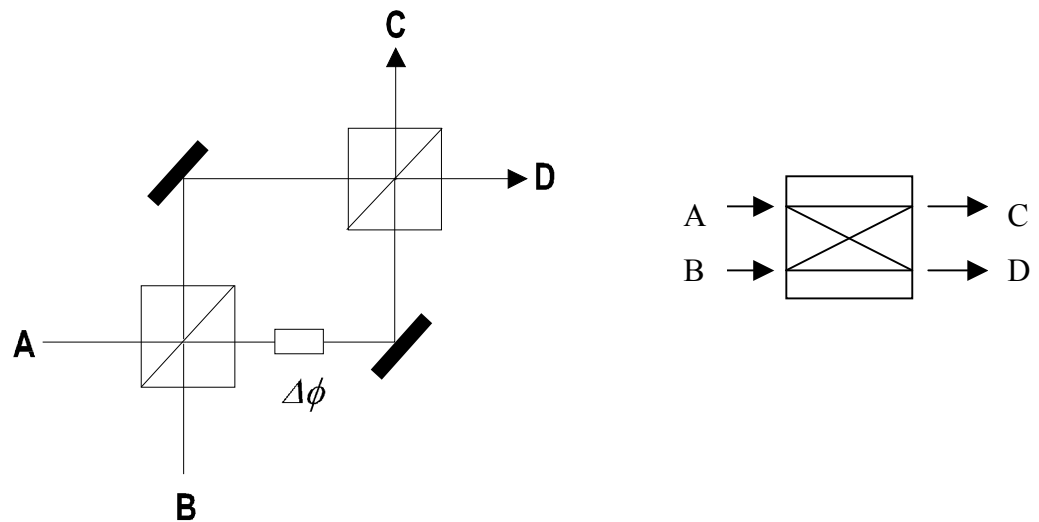
La fonction de ce composant est d'aplanir la courbe de gain des amplificateurs optiques afin de réguler l'intensité des différentes longueurs d'onde que véhicule la fibre optique. Cette opération se fait par égalisation continue du spectre (égalisation dynamique de gain) ou discrète (égalisation dynamique de canaux) Le principe général est de démultiplexer la bande spectrale utile et ensuite de réguler en intensité chaque portion de cette bande. La modulation d'amplitude se fait par du PDLC. Le montage optique a pour base un montage $4f$ où un réseau épais de diffraction est installé dans le plan de Fourier et le modulateur dans le plan image. Les différentes longueurs d'onde sont ainsi imagées sur le plan de sortie où se trouve une barrette d'atténuateurs en PDLC.



Ce montage optique nécessite en entrée un circulateur.

4.7.a Commutateur interférométrique

Pour faire de la commutation spatiale optique, on peut partir du composant le plus élémentaire : commutateur 2×2 . Une des solutions de base est l'interféromètre Mach-Zehnder. Il est composé de 2 séparatrices (cubes séparateurs) et de 2 miroirs (voir figure). Ce dispositif sépare un faisceau en deux sur la première séparatrice. En se recombinant sur la deuxième séparatrice, ces faisceaux vont interférer entre eux et le signal sortira en C ou D selon le déphasage accumulé sur les deux trajets optiques. Ce dispositif présente deux entrées et deux sorties possibles.

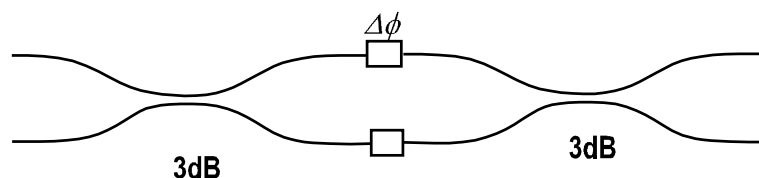


Principe du commutateur MZ

La matrice de transfert entre les entrées et sorties est la suivante :

$$\begin{pmatrix} C \\ D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sin^2(\Delta\phi/2) & \cos^2(\Delta\phi/2) \\ \cos^2(\Delta\phi/2) & \sin^2(\Delta\phi/2) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} B \\ A \end{pmatrix}$$

La matrice de transfert dépend de la technologie et de l'orientation des séparatrices. La modification du déphasage entre les bras de l'interféromètre permet le routage du faisceau sur l'une ou l'autre des sorties. La difficulté majeure, avec ce composant, est le réglage optique de l'interféromètre en espace libre ainsi que sa sensibilité aux vibrations. Dans le cas de l'interféromètre à fibre, c'est le contrôle de la polarisation dans les deux bras qui pose problème



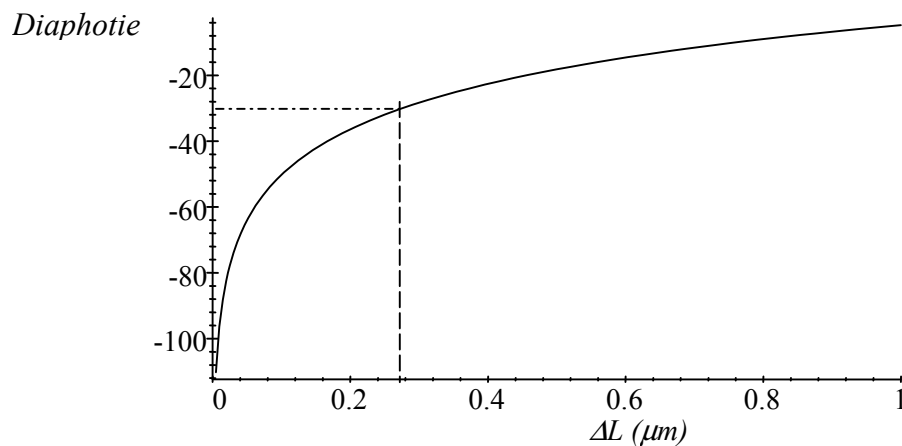
Commutateur 2×2 fibré.

La fonction de déphasage peut être réalisée de plusieurs façons : par modulation de biréfringence, effet thermo-optique, opto-mécanique etc. Avec le cristal liquide, plusieurs structures permettent cet effet quelque soit l'état de polarisation d'entrée :

1. Commutateur analogique (modulateur) : nano-PDLC déphasage isotrope insensible à la polarisation.
2. Commutateur deux états : cristal liquide ferroélectrique à axes tournant de 90° .

Les autres types de cristaux liquides ont des structures qui rendent le composant sensible à la polarisation d'entrée.

Dans le cas de l'interféromètre binaire (ferroélectrique), la principale source de diaphotie se situe dans l'imprécision de l'épaisseur du cristal liquide. Celle-ci représente une réelle difficulté technologique : pour avoir une faible diaphotie, typiquement -30 dB, il faut obtenir de grande précision sur l'épaisseur. ($\Delta l \approx 0,3 \mu m$ pour une épaisseur d'environ $4 \mu m$ soit 6% d'erreur).



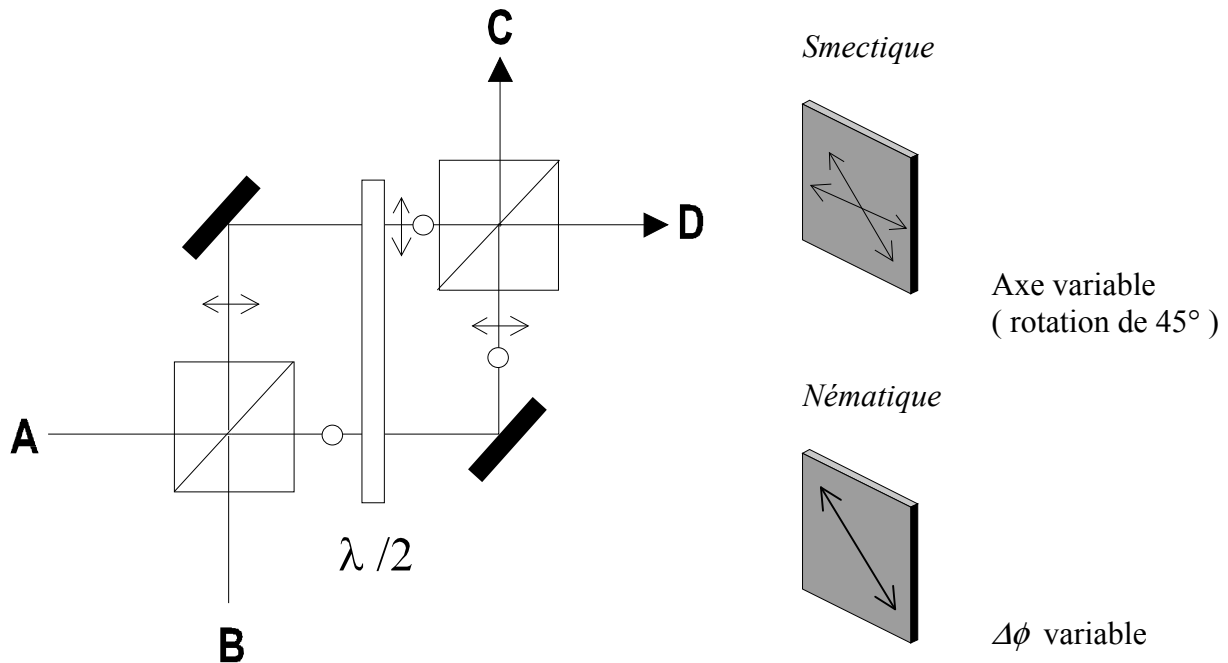
Diaphotie pour le commutateur 2 x 2 en fonction de l'erreur sur l'épaisseur (avec $\Delta n = 0,2$)

- Expérimentalement, l'utilisation d'espaceurs génère une dispersion de l'épaisseur des cellules à cristaux liquides. Cela implique qu'après la fabrication un tri des composants doit être effectué pour les classer en performance.
- Une bonne reconstruction cohérente des faisceaux en sortie de l'interféromètre en espace libre demande une grande précision sur l'alignement des composants optiques.
- Les trajets optiques doivent être identiques pour rendre le commutateur achromatique.

Pour le nano-PDLC, la variation analogique du déphasage permet d'obtenir précisément la bonne commutation avec un faible diaphotie.

4.7.b Commutateur à rotation de polarisation

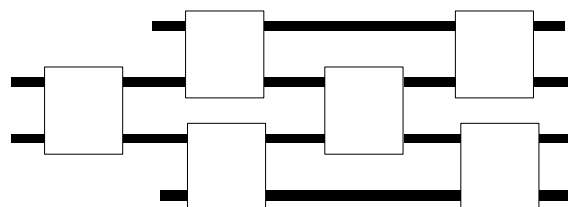
La polarisation du faisceau incident est séparée selon deux composantes orthogonales. Des lames $\lambda/2$ sont placées sur chacun des bras afin de pouvoir faire tourner chaque composante de 90° . Un deuxième cube séparateur de polarisation permet l'aiguillage dans les deux sorties : *C*, *D*. Pour ce commutateur, les cristaux liquides Smectique et Nématique sont bien adaptés en terme d'effet électro-optique.



La tolérance sur l'épaisseur pour avoir la même diaphotie est la même que celle du commutateur Mach-Zehnder. Deux avantages sont à souligner : le premier est la simplicité de l'alignement optique (tout en respectant l'égalité des trajets optiques pour ne pas générer de la PMD). Le second est qu'il suffit d'une cellule unique à cristaux liquides pour basculer d'un état vers l'autre.

Commutateur de large capacité :

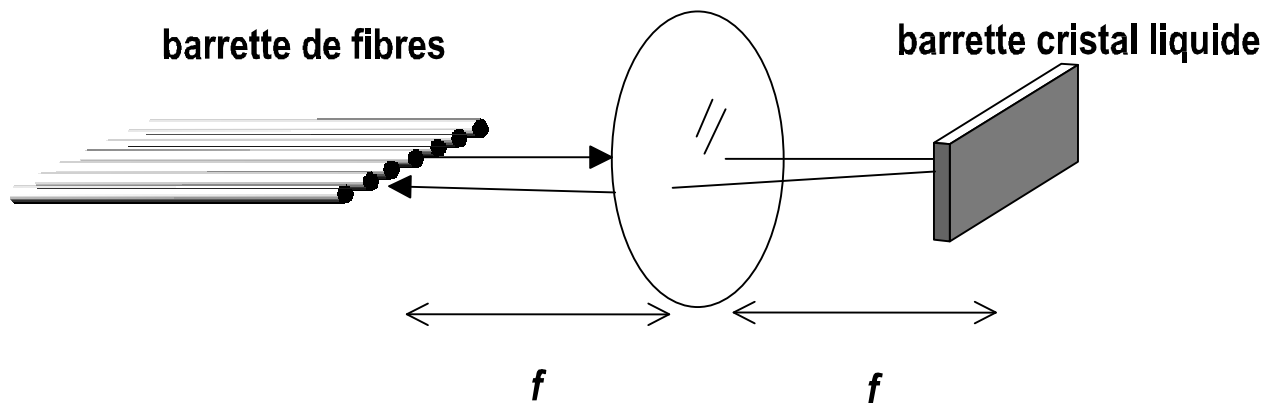
L'association de commutateurs 2×2 (interférométriques ou par rotation de polarisation) permet d'augmenter la capacité :



Commutateur 4×4

Avec cette architecture apparaît un problème de fond : les pertes, la diaphotie et la PDL s'additionnent, ce qui limite fortement l'augmentation de capacité.

4.7.c Commutateur par déflexion de faisceau



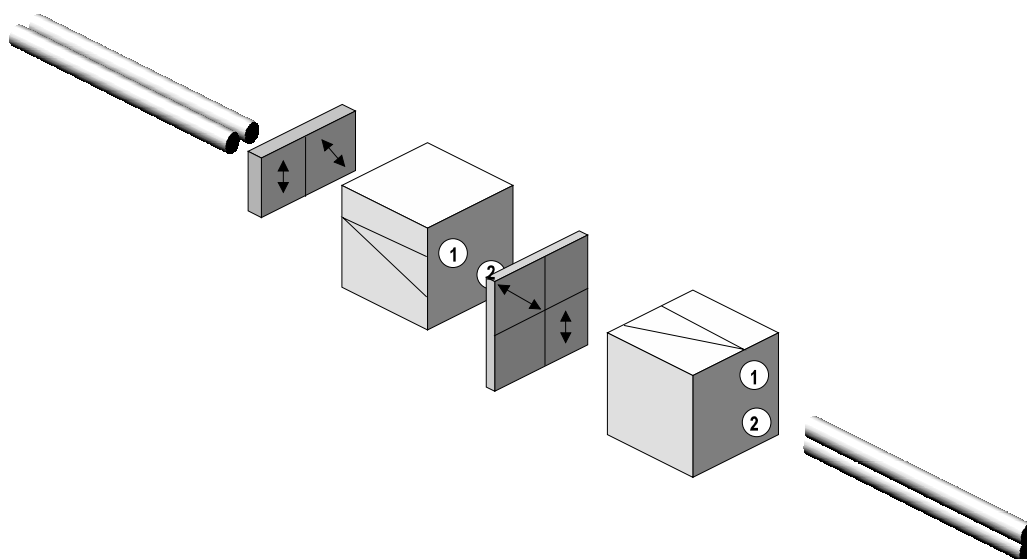
Le principe optique de base est un montage $4f$ replié. La barrette diffractive (régime Raman-Nath) à cristaux liquides est positionnée à une distance $2f$ de la barrette de fibre. La barrette à cristaux liquides a la même dimensionnalité que la barrette de fibres. Pour rendre le système intrinsèquement insensible à la polarisation, deux technologies de cristaux liquides peuvent être utilisées :

SmC* grand angle : réseau binaire de diffraction $0-\pi$

Nano-PDLC : Réseau analogique

4.7.d Le commutateur par double réfraction

L'assemblage de deux lames de calcite avec un système de rotateur de polarisation permet un commutateur 2×2 . Les cristaux liquides utilisés sont du nématique orienté à 45° des axes du système ou du ferroélectrique tournant de 45° . Ce dernier fonctionne avec un contrôle de la polarisation. Pour le rendre insensible, il faut traiter séparément les composantes de la polarisation et les recombinaison en sortie.



Exemple de commutateur 2×2 par commutation de polarisation

IV) Les technologies

1) Composants à cristaux liquides fibrés avec férule (Thèse Myriam Le Gall)

L'objectif est de fabriquer des composants compacts et bas coûts. Les fonctions élémentaires envisagées sont le déphasage, l'atténuation et la rotation d'état de polarisation.

Ce type de composant est le fruit de la rencontre entre deux technologies arrivées à maturité : La technologie de la connectique fibre et la technologie cristal liquide. L'enjeu était d'utiliser les composants de base existant de la connectique pour en faire des substrats aux cristaux liquides. Le principe est le suivant :

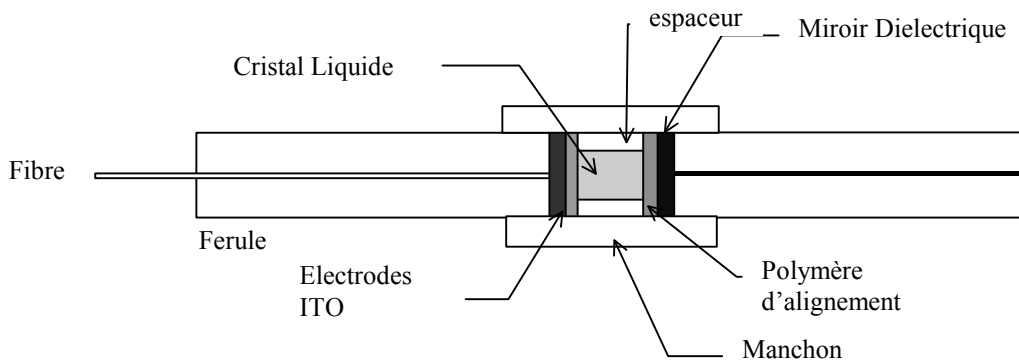


Figure 1 Composant à cristal liquide confiné entre deux férules

Les substrats sont des férules standards en oxyde de zirconium (zircone) maintenues en vis à vis par une bague fendue. Le cristal liquide est confiné entre les férules sur quelques microns voire quelques dizaines de microns d'épaisseur (voir figure 1). Avec ce type d'espacement, le couplage entre deux fibres monomodes reste excellent et une connectique simple (sans optique d'injection) est suffisante. Le cristal liquide permet de réaliser très simplement certaines fonctions optiques telles que changement d'états de polarisation, déphasage, atténuation etc. Ces composants sont avant tout destinés à être insérés dans des systèmes plus complexes tels que des interféromètres Mach-Zehnder par exemple pour réaliser des commutateurs optiques. Cette technologie semble prometteuse à condition que certaines difficultés technologiques soient levées pour l'adapter aux cristaux liquides :

1. Electrodes transparentes et prise de contacts électriques.
2. Polissage optique et planarisation de la section.
3. Dépôt de surfactant et brossage.
4. Contrôle de l'espacement entre férules.

La première difficulté est levée en prenant des férules qui possèdent des sillons latéraux. Un fil électrique recouvert de colle est déposé dans le sillon, il permet d'assurer le contact électrique avec la section de la férule sur laquelle le dépôt conducteur transparent sera uniformément déposé (voir figures 2.a , 2.b).

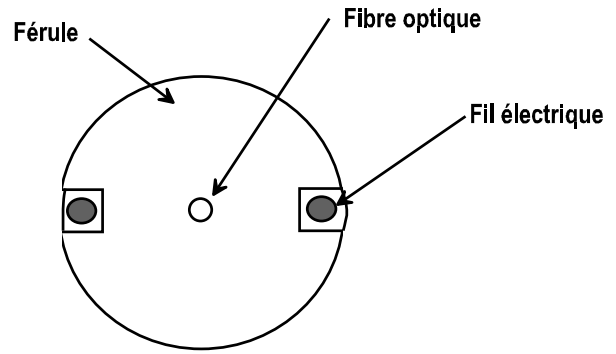
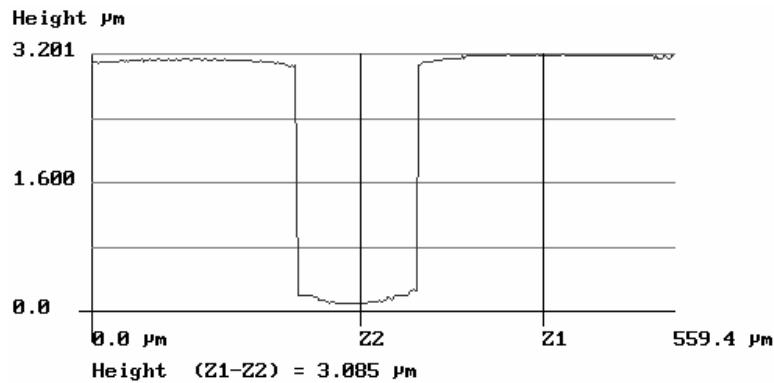
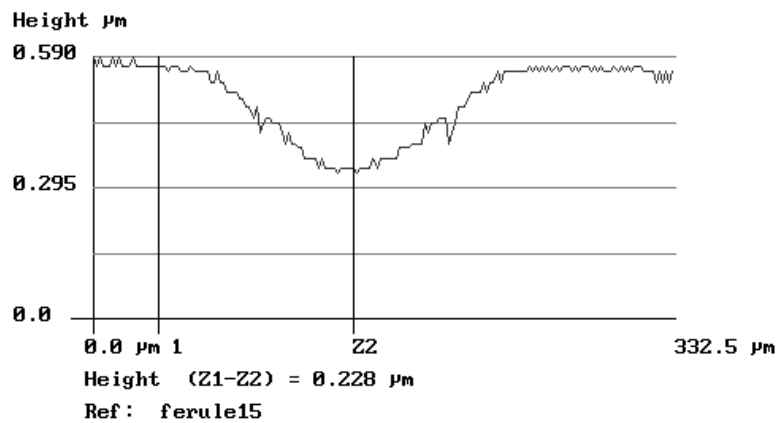


Figure 2.a : fêrûle avec sillons latéraux

Figure 2.b section de la fêrûle avec ses contacts électriques

La fibre est insérée dans la fêrûle puis collée. Un polissage est ensuite effectué sur la section.

Le deuxième problème est la planarisation de la section après polissage : le verre étant un matériau plus tendre que la zircone, on constate une abrasion beaucoup plus forte sur ce dernier. La conséquence est un rétreint de la fibre pouvant dépasser 1µm. Cet effet génère une indétermination sur l'épaisseur de cristal liquide.



Figures 3 : rétreint de la fibre après polissage
 Profils mesurés sur la section de fêrûle avec un faible et un fort rétreint de la fibre

1.2 Le troisième problème est le dépôt de polymère. Ce matériau ne peut pas être déposé par spin coating comme sur des substrats classiques. On procède par trempage dans une solution de polymère très diluée. Le problème de cette technique est une inhomogénéité en épaisseur du film de polymère.

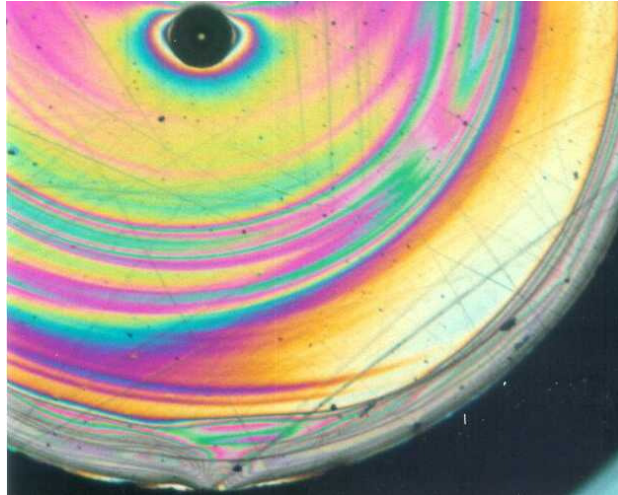


Figure 4 : inhomogénéité du dépôt de polymère

1.3 Le broissage s'effectue en maintenant la fêrule sur une plaque métallique. Celle-ci est fixée perpendiculairement au porte-substrat de la machine de broissage.

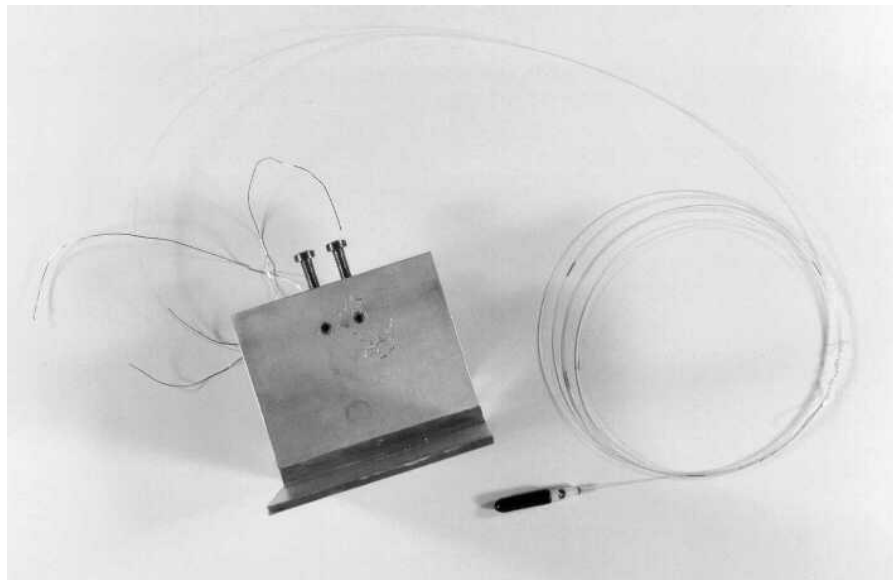


Figure 5 : support de fêrule pour peignage

1.4 L'assemblage est également une étape délicate pour imposer l'épaisseur voulue avec la bonne précision. Le dépôt d'espaces sur la section reste une méthode « artisanale » et qui conduit à des imprécisions sur l'espacement inter-fêrules.

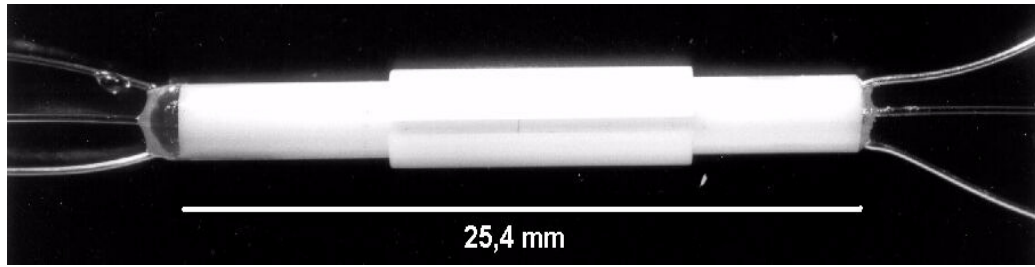


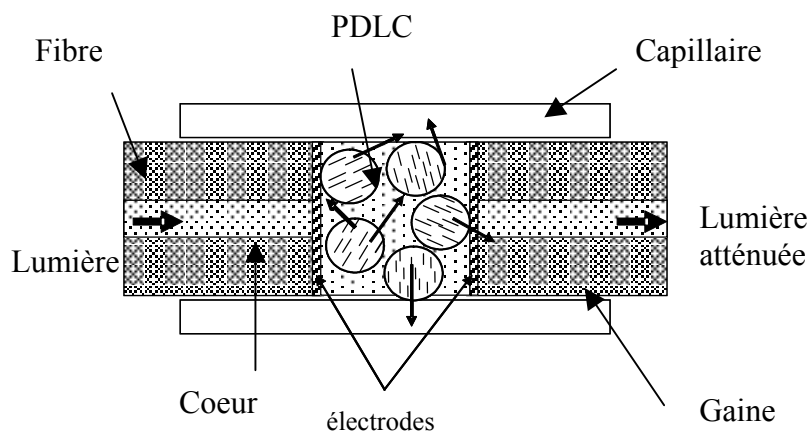
Figure 6 : composant final

Conclusions

Il reste de nombreux problèmes technologiques à résoudre et donc fatalement des problèmes d'industrialisation. L'effet électro-optique a été testé avec du cristal liquide large tilt (CS-2005) en vue de réaliser des déphaseurs binaires ($0-\pi$). Ces tests ont montré des caractéristiques de commutation très satisfaisantes et très proches de celles observées avec des cellules standards en verre ITO.

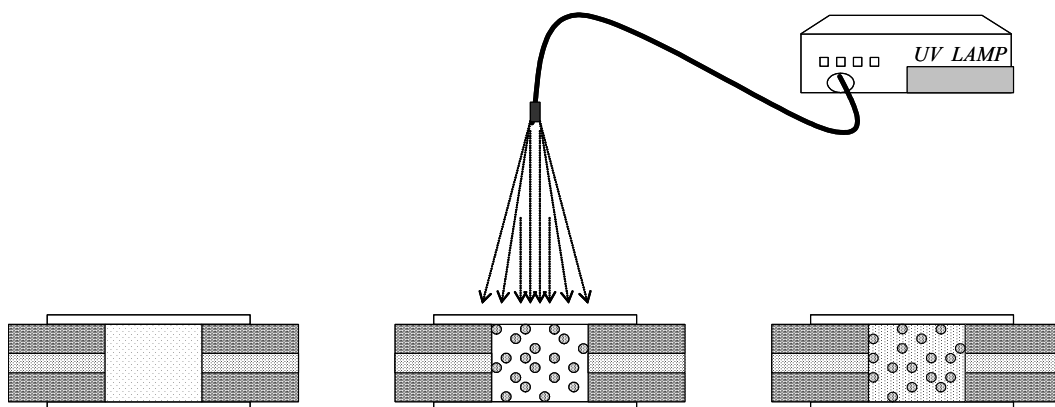
2) Atténuateur optique variable (Thèse Hary Ramanitra : co-encadrée avec P. Chanclou, en cours)

La structure précédente a été également développée dans le but de réaliser des atténuateurs optiques variables (Variable Optical Attenuator). Typiquement les caractéristiques demandées pour ces composants sont une dynamique d'atténuation comprise entre 10-30 dB et une PDL < 1dB. Une technologie assez similaire avait été développée chez NTT⁽¹⁾. Le matériau utilisé pour la fonction d'atténuation optique est du PDLC. Avec ce matériau, le film d'alignement n'est pas nécessaire, ce qui permet de créer une structure plus compacte. Là encore, le principe consiste à utiliser la technologie existante en connectique pour un composant optique bas coût. La première étape est de déposer une couche conductrice transparente sur des fibres optiques préalablement clivées (Or-Paladium), et d'insérer deux de ces fibres dans un capillaire en verre pour les mettre en vis à vis en aménageant un espace entre elles afin d'y introduire le mélange monomère / cristal liquide.



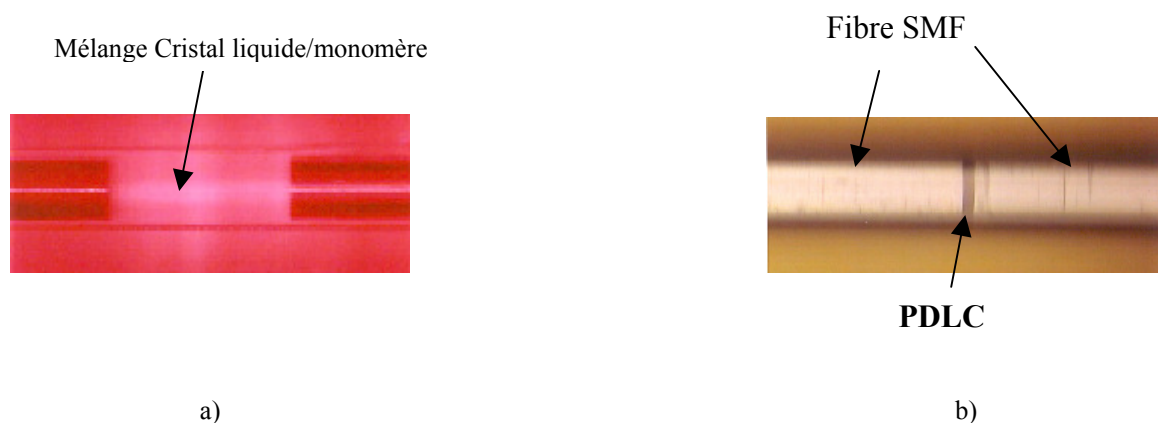
Principe du VOA

Le PDLC est obtenu par insolation du mélange par une source UV. Dans la géométrie décrite ci-dessus, la polymérisation s'effectue en plaçant la source UV au-dessus de l'atténuateur.



Principe de la fabrication des atténuateurs à PDLC

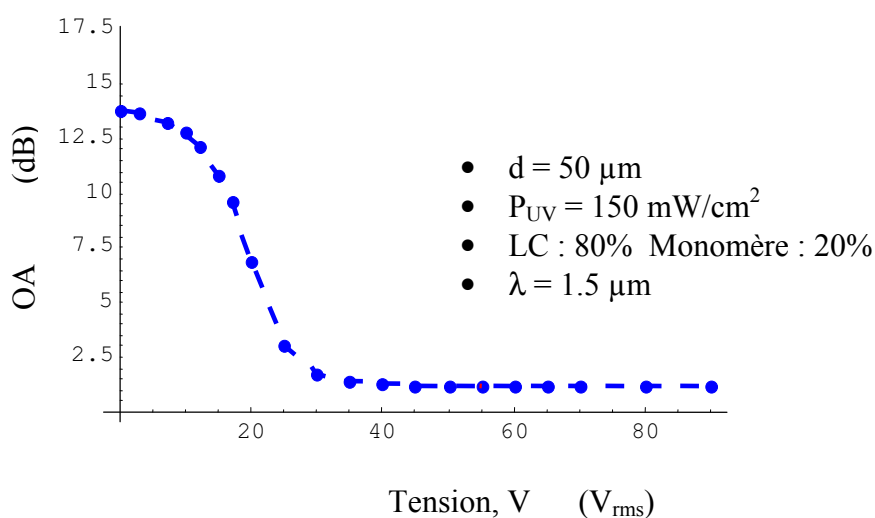
« Optical-Fiber variable attenuator arrays using polymer network liquid crystal », K. Hirabayashi, M. Wada, C. Amano, IEEE Photonics Technology Letters, Vol.13, No5, pp.487-489 (2001)



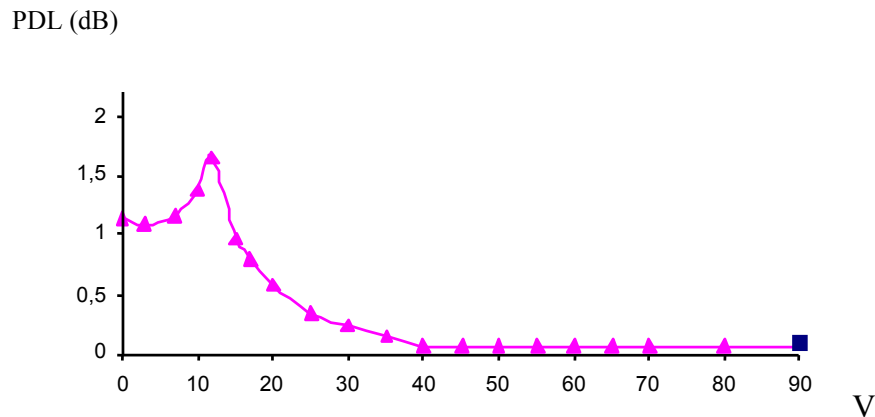
Vues microscopique de la zone active du VOA.

a) Avant polymérisation b) Après polymérisation et réglage de l'épaisseur (épaisseur du PDLC 50 μm).

Cette technique fait apparaître un manque de reproductibilité des performances du composant : dynamique d'atténuation et PDL. Une des explications possibles vient de l'épaisseur de mélange monomère/cristal liquide traversée par le rayonnement UV pour arriver sur la zone en face du cœur de la fibre : soit environ 60 μm . Cette épaisseur importante de mélange peut générer des structures très inhomogènes. Une autre possibilité est un effet de focalisation du faisceau UV du à la lentille constituée de la combinaison : fibre+capillaire qui peut introduire une insolation non uniforme dans le mélange. Quoi qu'il en soit, les mesures de PDL du VOA ne coïncident pas avec celles obtenues avec des cellules standards de PDLC.



Dynamique d'atténuation en fonction de la tension appliquée sur le VOA



PDL mesuré en fonction de la tension sur le VOA

L'analyse du problème est assez complexe du fait de l'impossibilité d'observer la structure du PDLC directement (avec un microscope). Cependant, les mesures de PDL, les faibles tensions de pilotage ainsi que les faibles dynamiques d'atténuation font penser que les gouttelettes ont des tailles importantes.

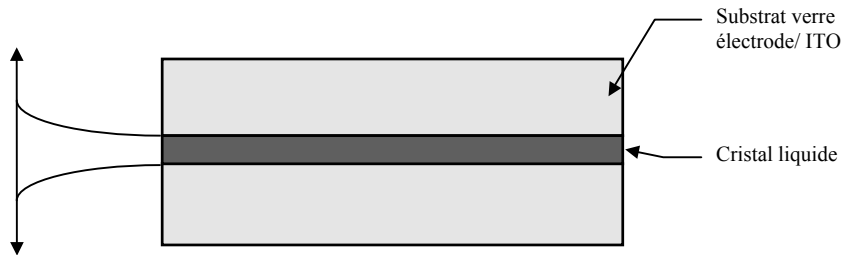
Le comportement de ce composant est quasiment insensible à la longueur d'onde. Des mesures ont été effectuées sur la bande C+L (λ : 1527-1615 nm) et elles ont montré une sensibilité de la dynamique d'atténuation de l'ordre de 1dB, ce qui est parfaitement acceptable.

Conclusions

L'objectif est maintenant de contrôler et fiabiliser le process de formation du PDLC pour abaisser la PDL et d'obtenir des données sur la structure de la matrice de polymère. La dynamique d'atténuation peut être augmentée en cascadeant les atténuateurs. Ce principe peut avoir un avantage : celui de moyennner la PDL et donc de l'abaisser.

3) Composants avec un mode guidé dans le cristal liquide (Thèse Esther Gros)

La structure standard d'une cellule à cristaux liquides est assez similaire à un guide optique planaire. C'est en partant de cette observation que des études ont été entreprises sur les guides planaires à base de cristaux liquides afin d'étudier leurs potentialités. Ces structures avaient l'avantage de combiner la souplesse du quasi-espace libre (on peut considérer que le faisceau dans le plan du substrat est en quasi-espace libre) et la fiabilité des structures guidées. L'originalité de cette étude consiste à utiliser les cristaux liquides en phase smectique moins diffusante que la phase nématique.

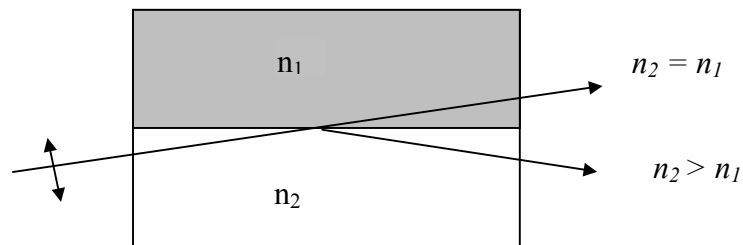


Plusieurs obstacles technologiques apparaissent cependant :

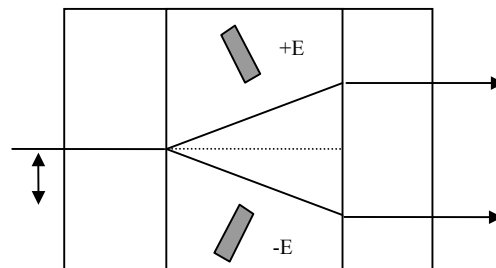
- Injection optique dans la structure : améliorer la qualité de la tranche de la cellule
- Favoriser la propagation monomode dans le guide à cristaux liquides
- Limiter la diffusion due aux défauts

3.1) Les fonctions dont l'étude a été envisagée :

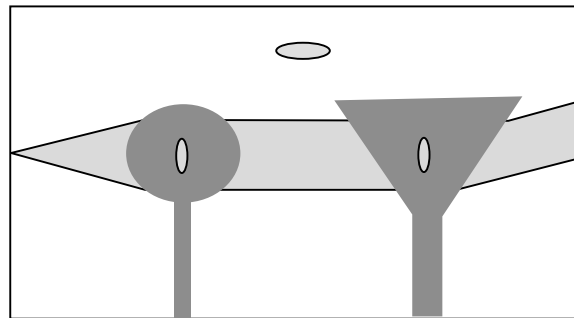
3.1.a) Réflexion totale



3.1.b) Double réfraction

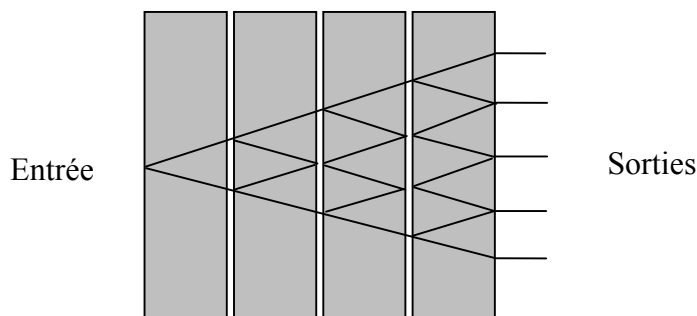


3.1.c) Réfraction



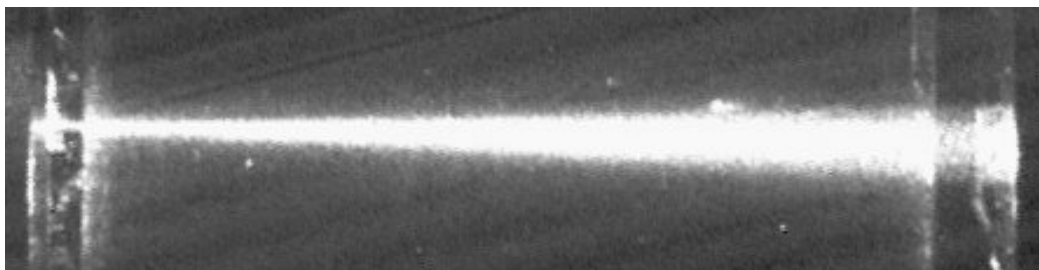
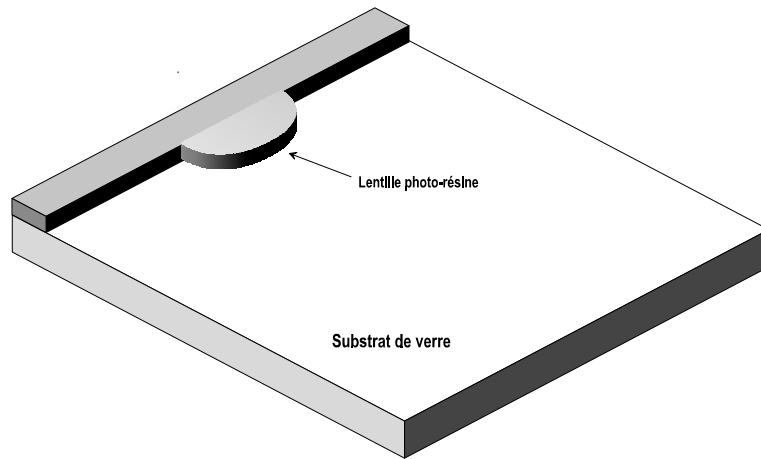
Cristal liquide
large tilt

L'étude s'est principalement focalisée sur l'étude de la double réfraction considérée comme la fonction la plus simple à mettre en œuvre avec les cristaux liquides en phase smectique. De plus, la cascade d'effet de double réfraction grâce à un système d'électrodes, permet de réaliser un commutateur 1 vers N :



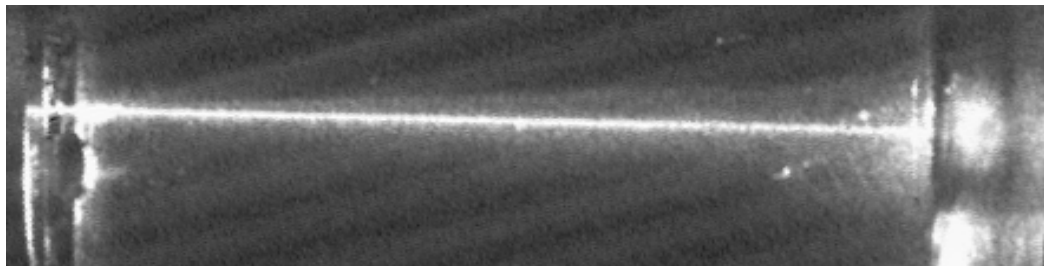
L'inconvénient majeur d'un tel composant est sa sensibilité à la polarisation. Il possède cependant plusieurs avantages : le trajet optique et le temps de commutation sont les mêmes quelle que soit la sortie adressée.

Pour valider le phénomène de double réfraction dans les guides à base de cristaux liquides en phases smectiques, la première étape a été d'optimiser l'injection par la tranche et de réaliser une optique de collimation planaire. Celle-ci est faite en résine photosensible à l'aide d'un masque. L'épaisseur de la photo-résine est la même que celle du cristal liquide.



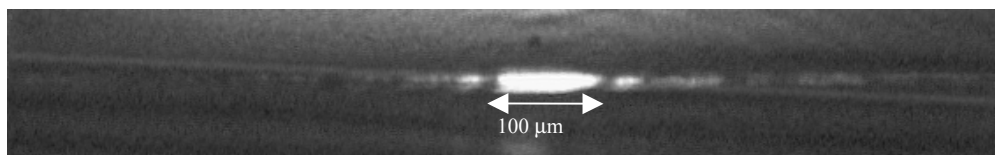
a

a) Propagation du faisceau dans le guide sans lentille de collimation



b

b) Propagation du faisceau dans le guide avec lentille de collimation

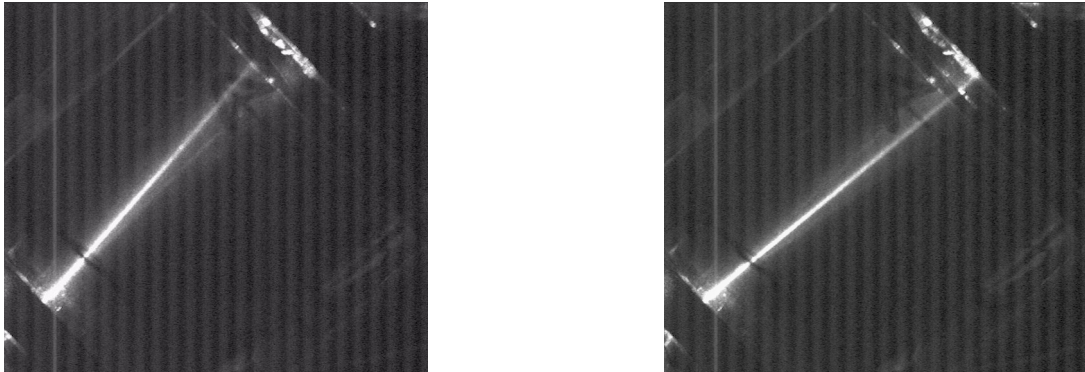


c

c) Faisceau collimaté en sortie de guide (vue par la tranche)

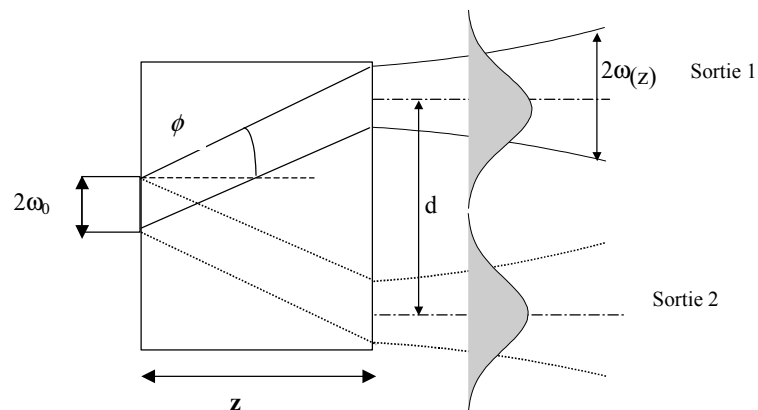
3.2) Déflexion de faisceau par double réfraction

Le cristal liquide utilisé est le SCE13 qui possède un angle de tilt de 23° et des indices optiques : $n_o = 1,57$ et $n_e = 1,75$ à $\lambda = 0,633 \mu m$. L'angle de double réfraction calculé est de : $\pm 6^\circ$ lorsque la normale aux couches est perpendiculaire au vecteur d'onde.



Déflexion du faisceau par double réfraction $+V$: $-V$ (CL : SCE13)

La commutation d'une cellule élémentaire génère deux propagations différentes du faisceau. En sortie, les deux modes sont récupérés par des guides adaptés. La séparation des deux faisceaux doit être alors suffisamment importante pour éviter la diaphotie classiquement fixée à -30 dB.



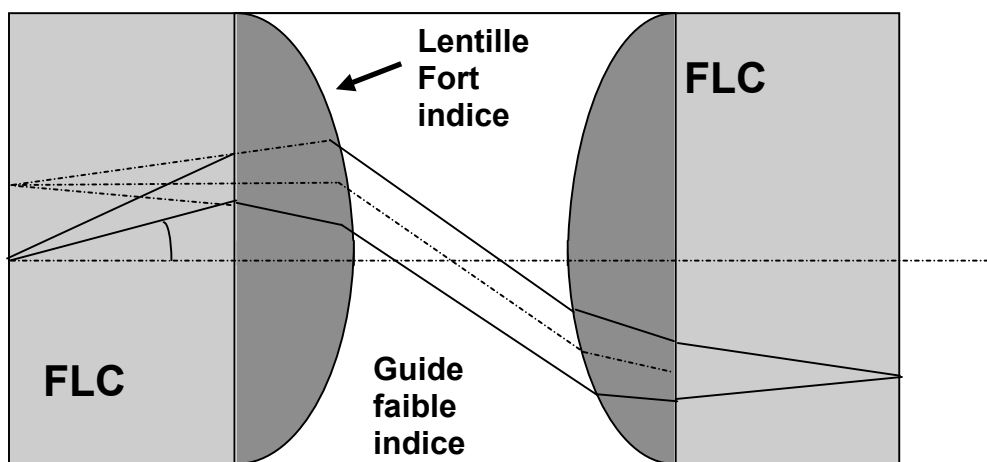
Soit d la distance en sortie entre les deux modes. Cette distance est calculée en utilisant la formule qui nous donne la diaphotie :

$$-10 \log_{10}(e^{-V^2}) \text{ dB} \quad \text{avec} \quad V = \frac{d}{\omega(z)}$$

V doit vérifier l'inégalité : $V \geq 2$ pour une diaphotie de -30 dB. Le nombre de sorties maximum est donc égal à :

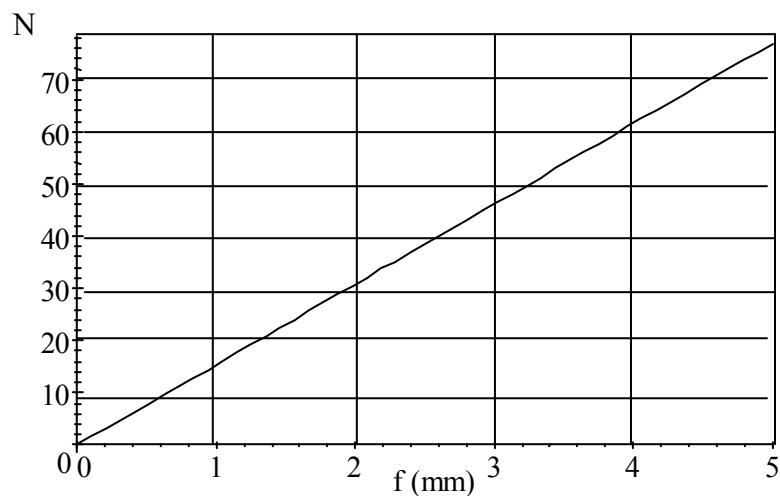
$$N = \frac{2z \tan \varphi}{d} = \frac{2z \tan \varphi}{V \omega(z)}$$

Avec ce type d'architecture, le nombre de sorties reste faible (ex : 20 sorties pour $z = 5$ cm de propagation de faisceau). Une architecture plus efficace consiste à utiliser un montage $4f$ en guidé :



Le nombre de sorties est alors égal à : $N = \frac{2f \tan \varphi}{V \omega_0}$. Classiquement avec un mode d'entrée

de diamètre : $2 \omega_0 = 10 \mu\text{m}$, on obtient plus de 70 sorties pour une distance focale de lentille de 5 mm.



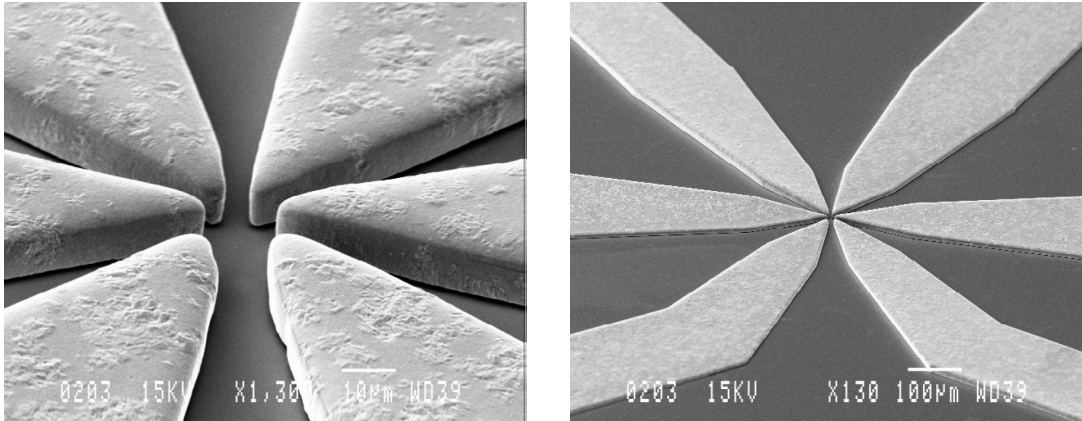
Conclusions

Dans cette étude, tout un process technologique a été développé avec succès. Cette filière technologique a, dès le départ, privilégié une approche « optique intégrée » en ayant par exemple des composants avec une injection par la tranche.

Ces composants qui allient la souplesse de l'espace libre et l'intégration de l'optique guidée permettent l'implantation d'une grande variété d'effets électro-optiques et de fonctions optiques. Les fonctions validées sont essentiellement de la commutation de type $1 \times N$ ou $N \times N$. Pour cela des effets de double réfraction de grande amplitude ont été mis en évidence, ce qui autorise la réalisation de matrice de commutation avec un grand nombre d'entrées - sorties.

4) Le contrôleur de polarisation (Thèse Thierry Sansoni)

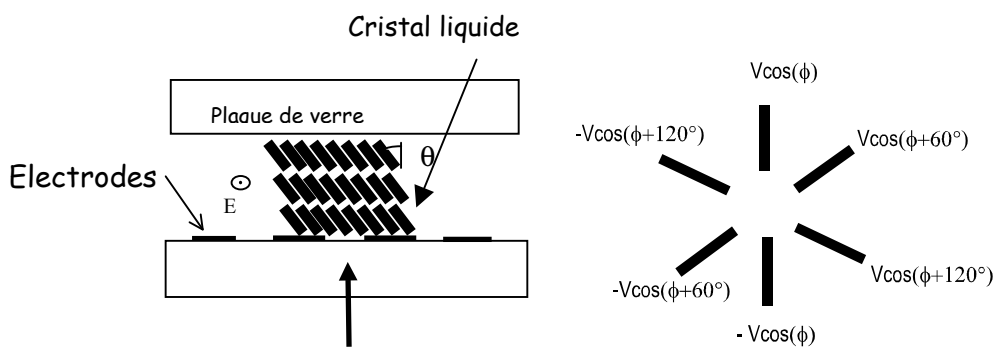
Deux structures de cellules élémentaires ont été étudiées. La première utilise des cristaux liquides en phase smectique A* (W415 D. Walba) et en phase smectique C* (SCE13 BDH) avec un système d'électrodes en ITO et un système d'électrodes en cuivre. La deuxième utilise du nano-PDLC avec des électrodes épaisses en cuivre.



Vue en microscopie électronique des électrodes épaisse de cuivre

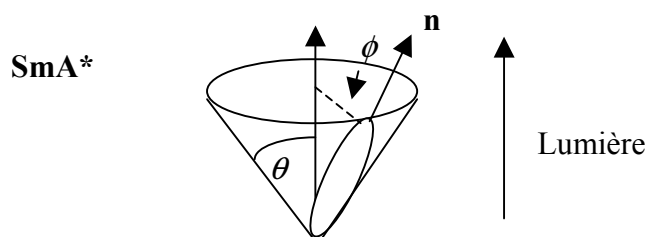
4.1 Principe de la rotation de la lame de phase par champ tournant.

Pour induire un champ tournant dans le plan, un système d'électrodes en étoile est gravé sur le substrat. L'application de tensions déphasées d'un angle égal à l'angle de la symétrie de rotation permet d'obtenir un champ tournant facilement pilotable :



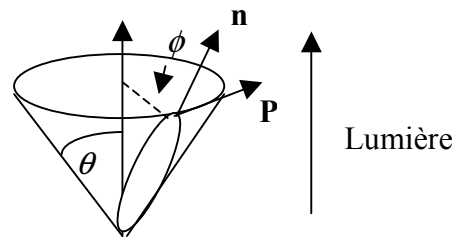
Design de la cellule en configuration homéotrope et champ tournant

4.2 Les différents matériaux et les effets électro-optiques envisagés :



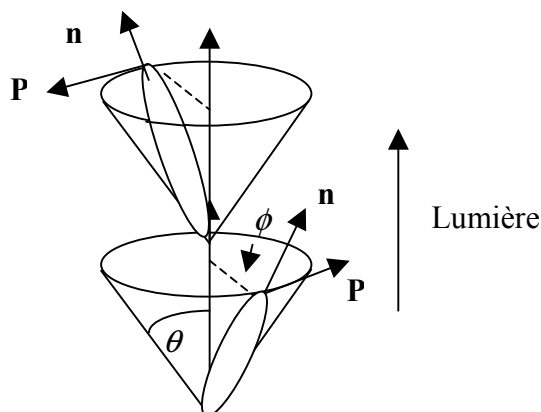
Avec cette mésophase, l'ellipsoïde des indices décrit un cône dont le demi-angle au sommet θ est proportionnel au champ électrique appliqué : $\vec{n} \times \vec{z} = \alpha \vec{E} = \theta$. α est le coefficient électroclinique. L'angle azimutal ϕ est donné par la direction du champ électrique. La biréfringence effective en orientation homéotrope est : $\Delta n \cong (n_e - n_o) \theta^2$

SmC*



En smectique C*, le directeur \mathbf{n} décrit un cône dont le demi-angle au sommet θ est constant : $|\mathbf{n} \times \mathbf{oz}| = \theta$. L'angle azimutal ϕ est donné par la direction du champ électrique, et la biréfringence effective est donnée par la même relation qu'en smectique A*.

Antiferroélectrique

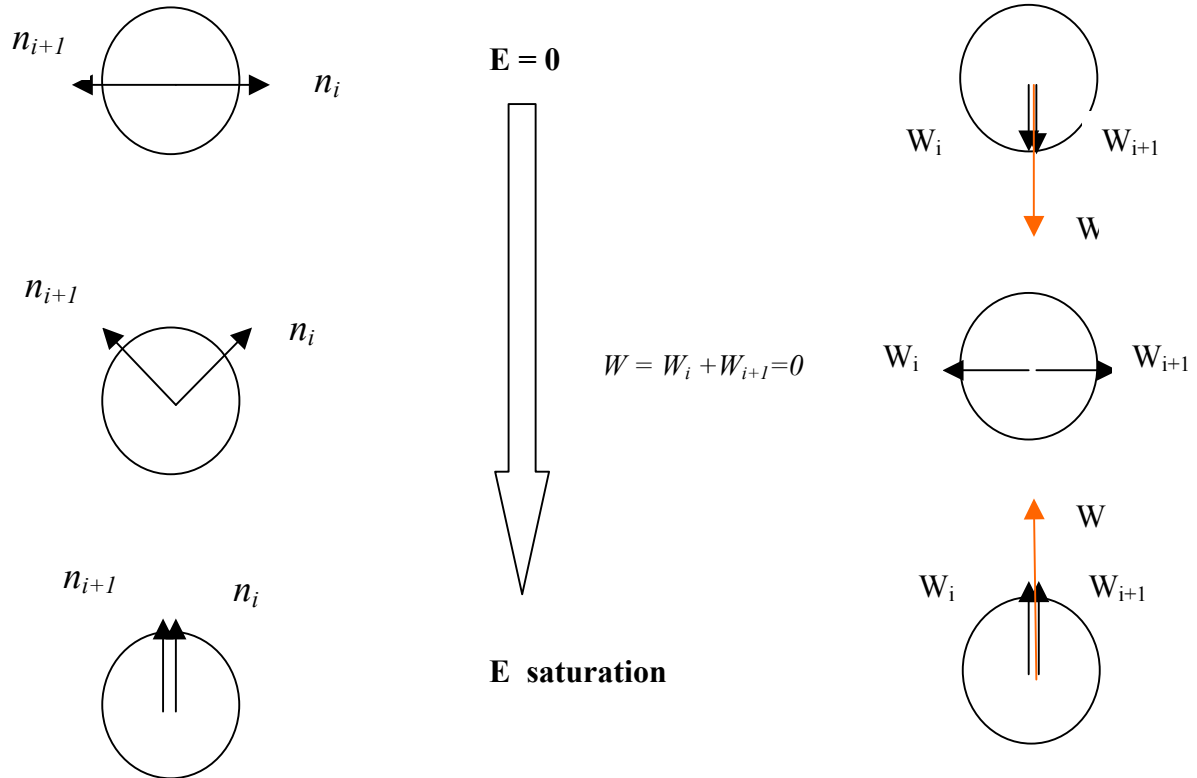


La structure intra-couche de la phase antiferroélectrique est similaire à celle de la phase smectique C*. Mais entre deux couches consécutives, il existe un ordre ferroélectrique : polarisations opposées et orientation du directeur opposée. L'application d'un champ électrique redresse les polarisations et fait passer la structure antiferroélectrique vers une structure ferroélectrique. Une description fine de la structure sans champ électrique montre qu'il existe une structure en hélice pour le directeur et de ce fait le système se comporte comme un biréfringent elliptique. Il existe une accordabilité de la biréfringence : en considérant deux couches consécutives, la biréfringence de la bicouche est définie par son vecteur de Stokes qui est la somme des vecteurs de stokes associés à chaque couche. L'augmentation de l'intensité du champ électrique fait donc apparaître une modulation de la norme du vecteur de biréfringence totale comme le montre le schéma ci-dessous.

Evolution des orientations du directeur dans deux couches smectiques consécutives et évolution du vecteur de Stokes de biréfringence : $\mathbf{W} = \Delta\beta \mathbf{S}$.

Directeur dans la bi-couche

Vecteur de biréfringence de la bi-couche (formalisme de Stokes)



A gauche : évolution du directeur dans deux couches successives en augmentant l'intensité du champ électrique. A droite, l'évolution correspondante des vecteurs de biréfringence .

Ce modèle doit cependant être affiné en tenant compte de la structure hélicoïdale et des phénomènes pré-transitionnels à champ faible.

Nano-PDLC

Le couplage diélectrique engendre une réorientation du cristal liquide dans les gouttelettes. Dans le cas d'un champ électrique transverse, la biréfringente induite suit une loi semi-empirique du type : $\Delta n \cong \alpha X (n_e - n_o) E^2$ où X , est la fraction de cristal liquide dans le PDLC.

4.3) Alignement homéotrope

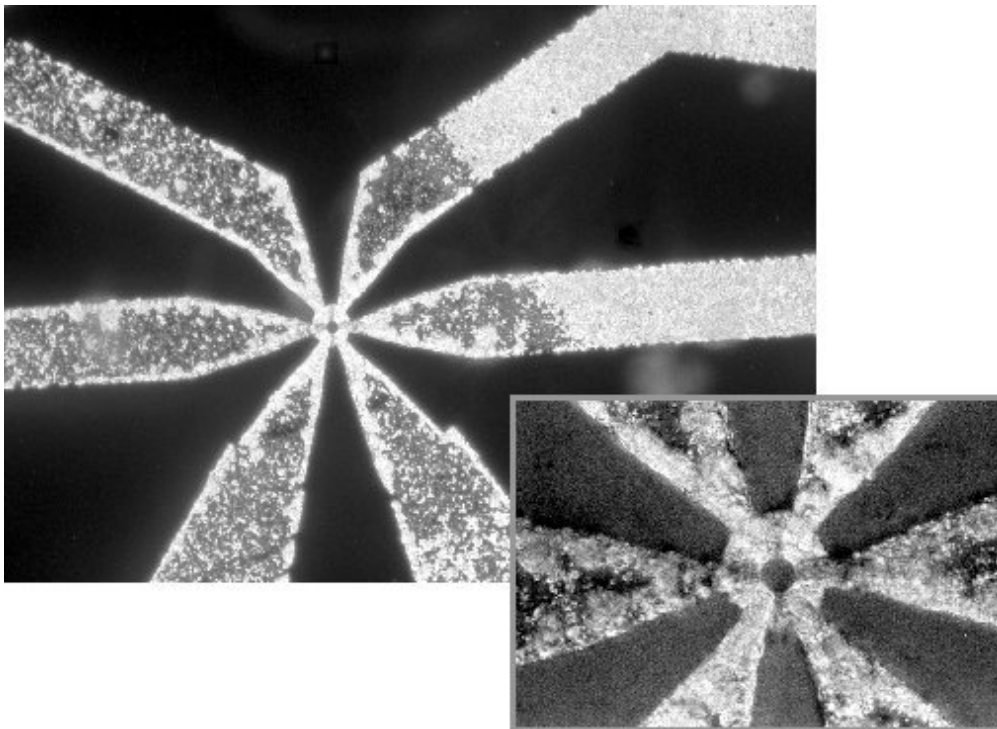
Un masque comportant plusieurs système de 6 électrodes a été réalisé avec des espacements entre électrodes opposées de 15, 20, 25, 30 μm (SAGEM Evap Service). Les substrats utilisés ont une épaisseur de 700 μm et proviennent de la société Glaverbel.

Le cristal liquide doit être orienté en configuration homéotrope. Pour cela plusieurs surfactants homéotrope ont été testés :

1. Octadécyl-trichlorosilane (Aldrich)
2. Polysiloxane (Techneglass)
3. Liquicoat ZLI-3334 (Merck).

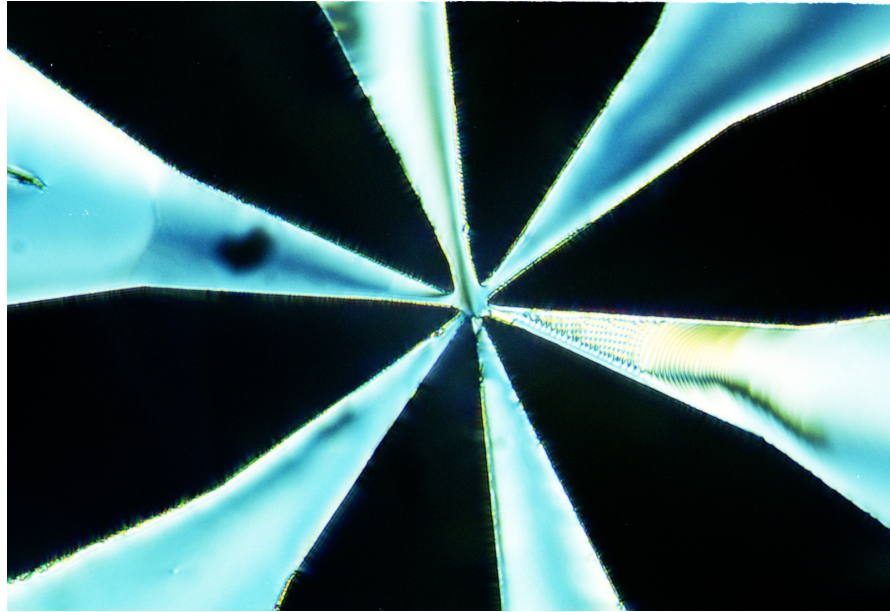
Le premier surfactant est utilisé par la méthode de trempage du substrat. Les résultats sont bons sur des substrats de verre mais par contre, ce produit attaque fortement les électrodes (cet effet est attribué à une hydrolyse du silane avec formation d'acide chlorhydrique).

Le polysiloxane est solubilisé dans le propanol (1%) puis déposé par spin-coating aussitôt suivi d'un recuit à 180°C. Les résultats ont montré des qualités très inégales et peu reproductible de l'alignement. De plus (voir photo ci-dessous), l'alignement est bien homéotrope, là où le substrat de verre est affleurant par contre sur l'ITO, l'alignement est planaire. D'autre part des dégradations de l'alignement ont été observées au cours du temps. Sur les électrodes épaisses de cuivre, l'alignement est très mauvais.



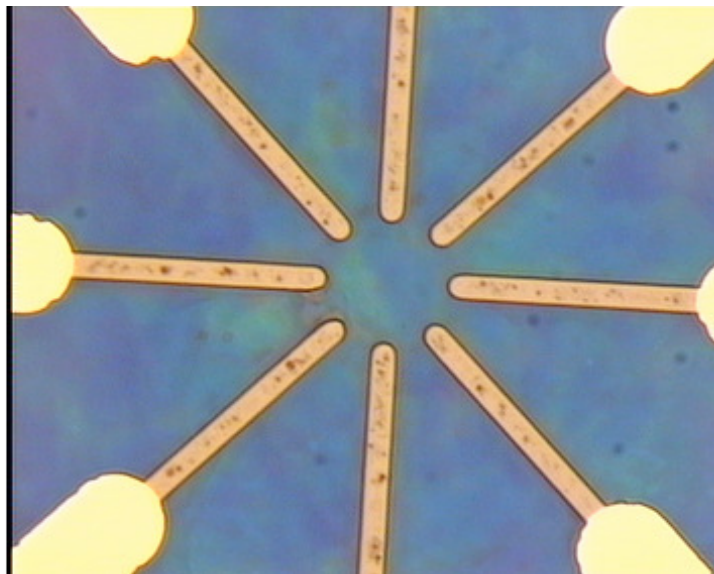
*Photos en microscopie optique polarisée grossissement x 50, x 400
Cristal liquide SmA* orienté homéotrope avec électrodes ITO*

Des essais ont été également effectués avec le ZLI-3334 en phase SC* et SA* et ils ont montré une bonne qualité d'alignement dans ces deux phases avec électrodes ITO et électrodes épaisses en cuivre. Dans le cas des cellules en phase smectique C*, la compression des couches dans une cellule scellée entraîne une ondulation des couches qui génère un phénomène de diffusion important. Ce problème est résolu en collant les substrats après positionnement des électrodes et refroidissement du cristal liquide à température ambiante (phase SC*). Mais ce process pose bien évidemment de nombreux problèmes de fiabilité.



Alignement homéotrope du cristal liquide en phase SC G X 50 avec électrodes épaisses (Cu).*

L'alignement du cristal liquide antiferroélectrique est, contre toute attente, d'excellente qualité. Cependant une structure hélicoïdale existe en l'absence de champ électrique.

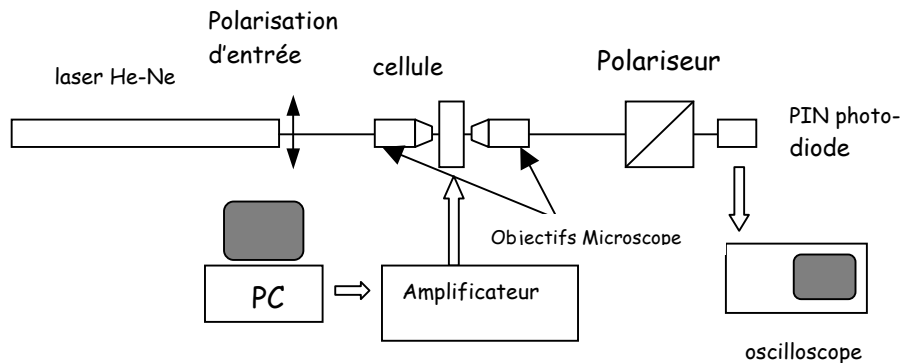


Alignement homéotrope du cristal liquide antiferroélectrique CS4000

4.4 Structures et performances de cellules avec des phases smectiques.

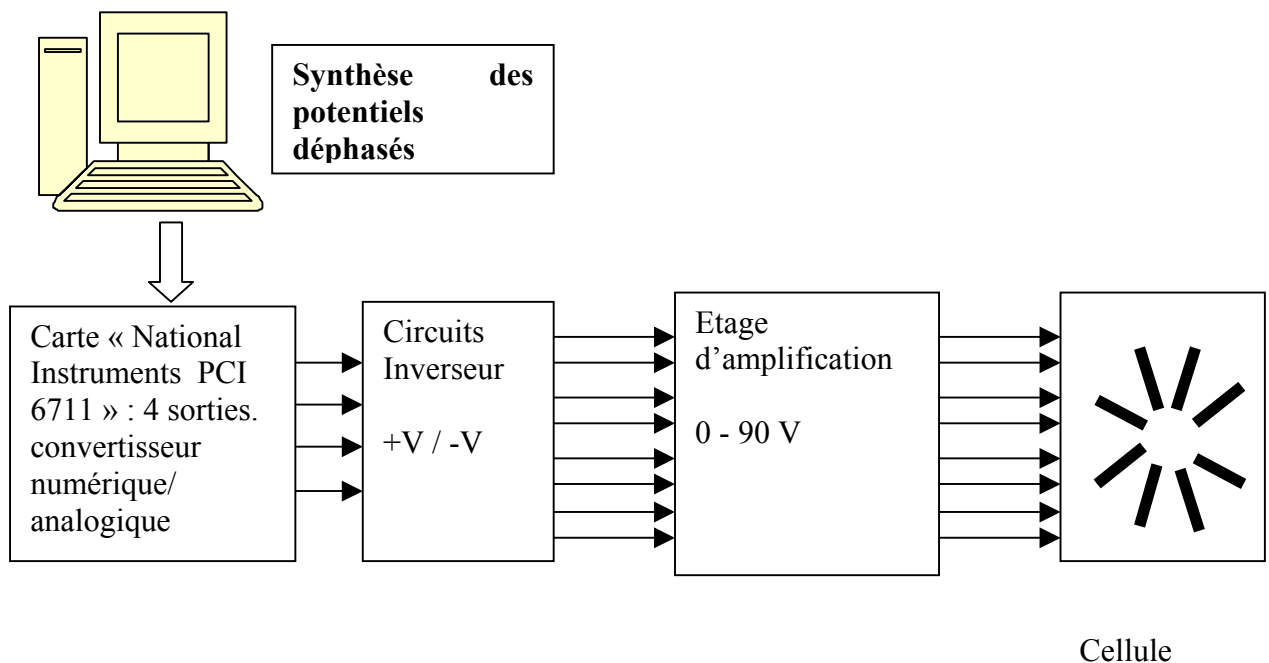
4.4.a cellules et montage expérimental

Le banc optique de caractérisation est constitué de la cellule entre un polariseur et un analyseur parallèle. En faisant tourner par le champ électrique le cristal liquide, une modulation d'intensité est observée. L'amplitude de cette modulation donne directement le déphasage de la cellule. Le montage est le suivant:



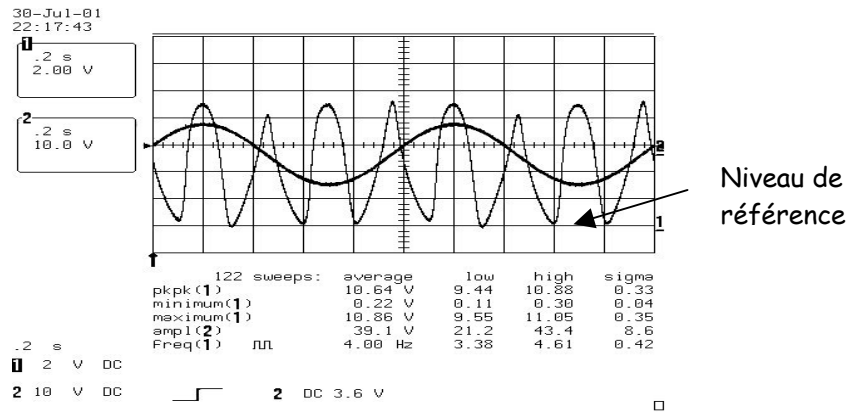
Montage optique expérimental de caractérisation des cellules

La carte "National Instrument" génère 3 signaux électriques sinusoïdaux déphasés. Ces signaux sont envoyés dans l'étage d'amplification qui va générer les 6 / 8 signaux électriques alimentant la cellule.



Principe du pilotage de la lame biréfringente

La réponse optique détectée est une modulation d'intensité périodique à une fréquence quatre fois plus élevée que celle du champ électrique de pilotage :



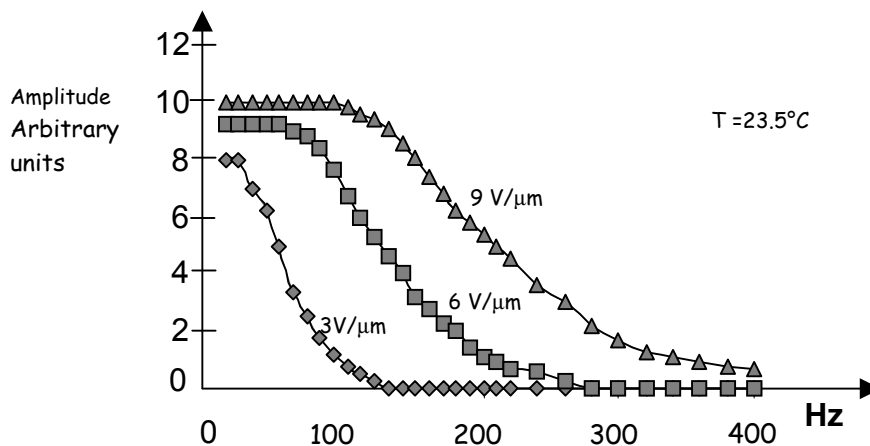
Oscillogramme de la réponse optique de la cellule en champ tournant.

4.4.b Cellule à effet électroclinique

La première cellule étudiée est constituée de deux plaques de verre avec une épaisseur de cristaux liquides de $18 \mu\text{m}$. Le cristal liquide W415 est dans une configuration de cellule avec un seul substrat gravé pour éviter le problème de l'alignement des deux systèmes d'électrodes. La distance entre deux électrodes opposées est de $15 \mu\text{m}$.

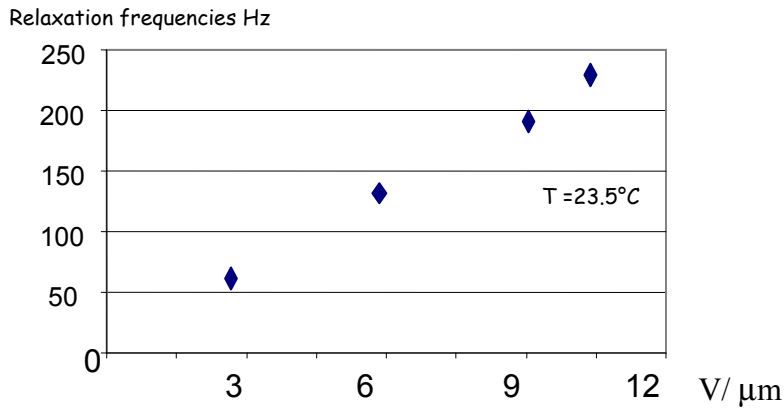
A 24°C le déphasage est de $0,9\pi$ à $\lambda = 633 \text{ nm}$, pour des champs électriques de $7 \text{ V}/\mu\text{m}$. La réponse dynamique de la cellule a été étudiée de deux façons : en champ tournant et en champ impulsionnel.

Les fréquences de relaxation en champ tournant sont obtenues en faisant varier la fréquence de rotation du champ électrique appliqué et en mesurant l'amplitude du signal optique. Les résultats sont présentés par les courbes suivantes, pour différentes amplitudes de champs.



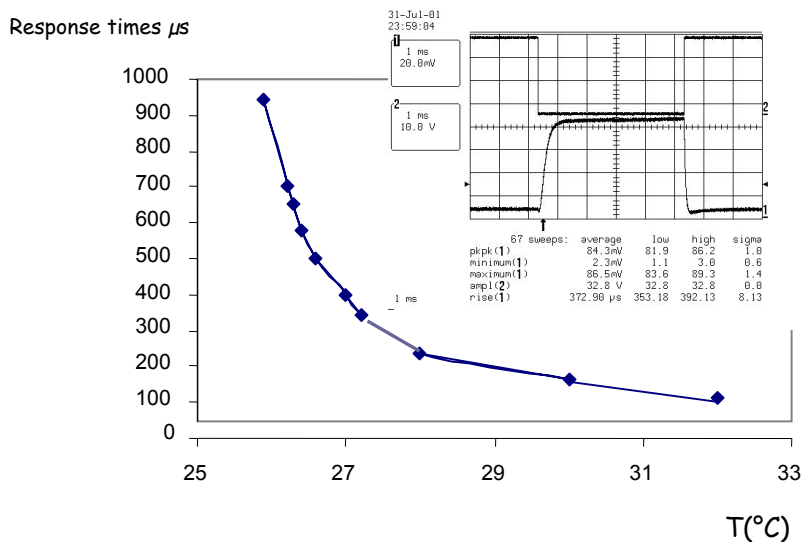
Réponse fréquentielle de la cellule en champ tournant pour diverses valeurs du champ électrique appliqué.

La réponse dynamique de la cellule montre un comportement fortement non-linéaire (le temps de réponse dépend du champ appliqué) qui est typique de l'effet électroclinique à proximité de la transition SA*-SC*.



Fréquence de relaxation de la cellule en fonction du champ électrique

Dans le cas de la réponse à une impulsion de tension : $0 \rightarrow +V$, le champ est appliqué à 45° des polariseurs. Le cristal liquide montre les temps de réponse suivants, pour différentes températures et pour une tension crête appliquée de 140 V :



Temps de réponse en régime impulsionnel en fonction de la température

4.4.c Cellule avec smectique C*

Ce type de cellule est adapté au contrôleur à biréfringence fixe. Mais au vu des problèmes rencontrés concernant le matériau et la technologie de fabrication : ondulation des couches, collage des substrats après remplissage etc , ce type de contrôleur a été vite abandonné.

4.4.d Le contrôleur avec nano-PDLC. (Etude en cours).

Le mélange cristal liquide / monomère doit être optimisé pour répondre aux critères suivants :

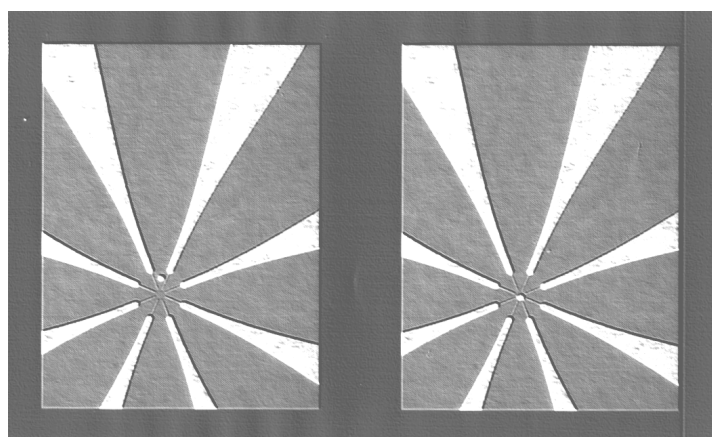
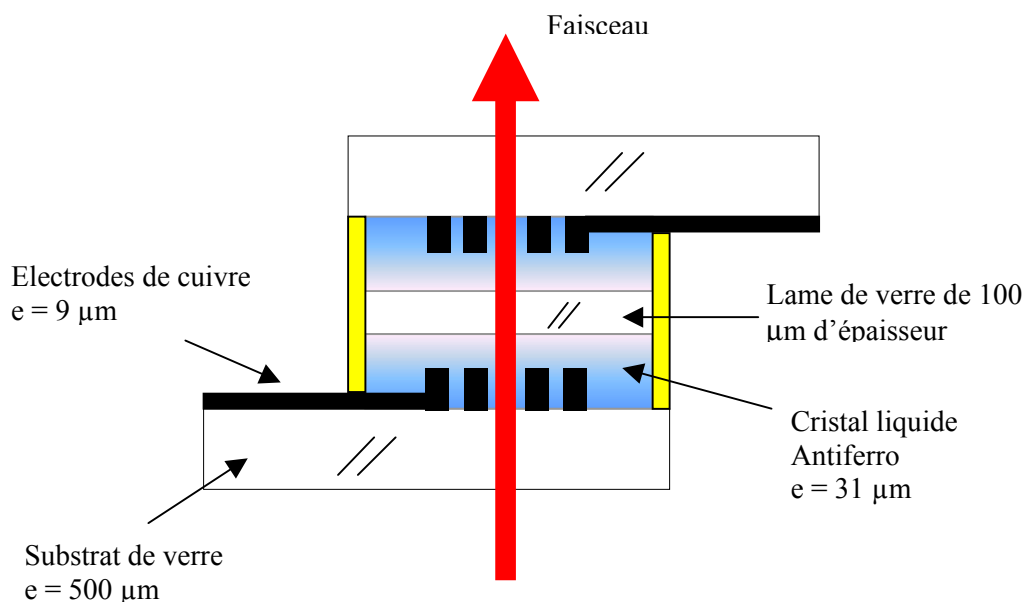
1. Obtenir un déphasage de π pour une épaisseur d'une dizaine de microns.
2. PDL < 0,5 dB.
3. Perte d'insertion < 1dB .

Le premier critère impose une proportion de cristal liquide d'au moins 50% par rapport au monomère. Deux systèmes sont en cours d'évaluation :

Le mélange NOA81 / BL009 et le mélange PN 393 / TL 205. Le premier utilise un cristal liquide (BL009) avec une forte biréfringence, mais la concentration de cristal liquide peut difficilement dépasser 50% à cause de la température élevée de démixtion. Le second mélange autorise des concentrations de cristal liquide (TL 205) plus élevée (80%) ce qui peut entraîner plus de diffusion et donc des pertes importantes. De plus, ce dernier a une moins forte biréfringence.

4.4.e Le contrôleur avec le cristal liquide antiferroélectrique .

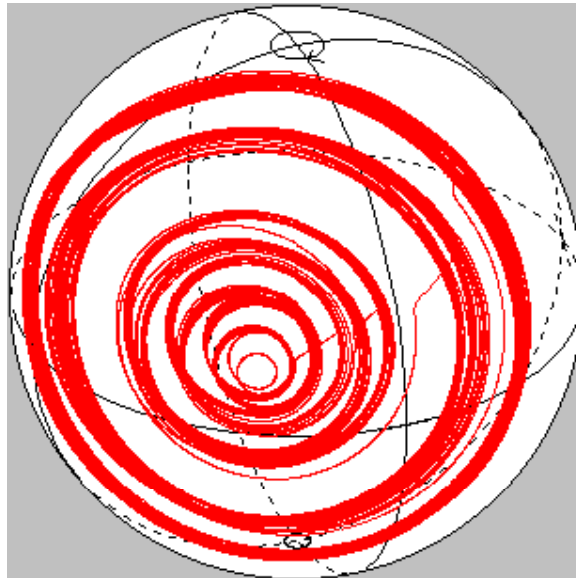
La configuration du contrôleur de polarisation qui a été retenue est celle de deux lames biréfringentes à cristal liquide avec champ tournant et biréfringence variable, séparées par une plaque de verre de 100 μm d'épaisseur. Cette architecture découle de deux contraintes fortes. La première est d'ordre technologique : l'injection optique est simplifiée. La deuxième est fonctionnelle : une fibre optique entre deux cellules génère de la biréfringence et de ce fait perturbe le fonctionnement du contrôleur. Le cristal liquide utilisé est le CS 2005 (Chisso). Ce cristal s'aligne très bien en géométrie homéotrope et aucune évolution de la structure n'a été observée. De plus, l'angle d'inclinaison induit est important : 27°.



Focalisation du faisceau au centre des électrodes

4.4.f Test polarimétrique

Le composant à base de cristaux liquides antiferroélectrique possède un déphasage maximum d'environ 90° . En continuant d'augmenter la tension le déphasage diminue. Cet effet a pour origine un phénomène de flux dans le cristal liquide au voisinage du centre des électrodes. Une des hypothèse pour l'origine de ce phénomène est l'existence de gradient de champ très intense dans cette région de la cellule. Cet effet favorise donc les cristaux liquides dispersés ou stabilisés dans du polymère.



Etats de polarisation de sortie du contrôleur de polarisation sur la sphère de Poincaré en faisant tourner une lame du contrôleur

Conclusions

Des études optiques en dynamique sont en cours sur le contrôleur à base de cristal liquide antiferroélectrique et sur le contrôleur à base de nano-PDLC. Concernant ce composant, la technologie de fabrication est finalisée et donne de bons résultats et la structure homéotrope ne présente pas de dégradation dans le temps. Les caractéristiques optiques de ce matériau sont en grande partie compatibles avec les performances exigées (déphasage, temps de réponse). Il reste de nombreux points technologiques à optimiser, essentiellement au niveau du design des électrodes : écartement, nombre, épaisseur. Il reste également à effectuer des tests comparatifs entre le contrôleur à base de nano-PDLC et celui à base de cristal liquide antiferroélectrique.

Conclusions

Les efforts de recherches dans le domaine des applications du cristal liquide aux télécommunications optiques vont se faire au travers d'une collaboration étroite avec la société OPTOGONE. Des études amont vont être entreprises sur des nouveaux matériaux, par exemple les cristaux liquides en phase smectique stabilisée par polymère (Polymer Stabilized Ferroelectric Liquid crystal) qui permettent à la fois de stabiliser la structure du cristal liquide et de bénéficier des temps de réponse rapides de ces matériaux.

Des études sur des aspects plus fonctionnels de la compensation de PMD vont être poursuivies. Ces études devront fournir des informations sur l'architecture optimale du contrôleur de polarisation ainsi que sur les algorithmes de pilotage. Un contrat Européen CRAFT est en cours de finalisation sur ce sujet.