



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA  
RECHERCHE SCIENTIFIQUE



**UNIVERSITE ABOU-BEKR BELKAID –  
TLEMCEM**

# MEMOIRE

Présenté à :

FACULTE DES SCIENCES – DEPARTEMENT DE CHIMIE

Pour l'obtention du diplôme de :

**MASTER EN CHIMIE**

Spécialité : Chimie Des Matériaux

Par :

**Mr NEMICHE Mohammed Riyad**

Sur le thème

---

## **Etude des propriétés thermodynamiques des mélanges de polymères et de cristaux liquides recyclés**

---

Soutenu publiquement le 25 juin 2023 à Tlemcen devant le jury composé de :

Mme KARA SLIMAN Sofia	Professeure	Université de Tlemcen	Présidente
Mme ABDOUN Fatima Zohra	Professeure	Université de Tlemcen	Examinatrice
Mr BENDAHMANE Fouzi	Maitre de conférences B	Université de Tlemcen	
Mr MEHTARI Nabil	Partenaire socio-économique	Université de Tlemcen	
Mme BEDJAQUI Lamia	Professeure	Université de Tlemcen	Encadrante
Mme BOURICHE Amina	Maitre de conférences B	Université de Tlemcen	Co-encadrant

*Année Universitaire : 2022 ~ 2023*



## Remerciements

Ce travail de mémoire de master a été réalisé au laboratoire de recherche sur les macromolécules (LRM), de la faculté des sciences à l'université de Tlemcen, sous la direction du professeur **ARABECHE Khadidja**.

Ma plus grande gratitude à la personne sans laquelle je n'aurais pas pu continuer mes études et plus précisément dans cette spécialité mon encadrante Madame **BEDJAOUI- ALACHAHER Lamia** professeure à l'université de Tlemcen, qui m'a tiré vers le haut. Je tiens à la remercier chaleureusement pour son expertise qui a été d'une valeur inestimable tout au long de ce processus. Ses connaissances approfondies, sa rigueur méthodologique et sa disponibilité constante ont été essentielles pour orienter mes recherches et garantir la qualité de mon travail. Je suis également reconnaissant pour les discussions enrichissantes que nous avons eues au cours des séances de suivi. Son exigence intellectuelle m'a permis de progresser et d'affiner mes compétences de recherche.

Je remercie également ma co-encadrante Madame **BOURICHE Amina** maître de conférences B à l'université de Tlemcen pour sa présence, le temps qu'elle m'a accordé et ses précieux conseils dont j'ai pu bénéficier et qui m'ont permis de mener à bien ce travail.

J'exprime toute ma gratitude à Madame **KARA SLIMANE Sofia**, professeure à l'université de Tlemcen, pour avoir bien voulu accepter de présider le jury de ce travail et honorer de sa participation cette soutenance, je l'en remercie vivement. Que Madame **BENKHALED-ABDOUNE Fatima Zohra**, professeure à l'université de Tlemcen, trouve ici l'expression de mes vifs remerciements, pour avoir bien voulu juger ce travail en tant qu'examinatrice.

Ma reconnaissance va également à Mr **BENDAHMANE Fouzi**, pour avoir accepté d'évaluer ce mémoire en tant que représentant de I2E. Je remercie aussi Mr **MEHTARI Nabil**, de me faire l'honneur pour s'être intéressé à ce travail et avoir bien voulu l'expertiser en étant la partenaire socio-économique.

Je remercie Monsieur **Ulrich MASCHKE** directeur de recherche à l'université de Lille 1, de nous avoir aimablement fourni des cristaux liquides recyclés qui ont été utilisés lors de ce stage.

Je voudrai également remercier l'ingénieur responsable au laboratoire LRM Monsieur **BENABDELLAH Sid Ahmed** pour son engagement, son dévouement et son aide qui ont été très précieuses.

Je tiens à remercier du fond du cœur **BENDEDDOUCHE Djazia, HAKEM Ghizlene Fatima Zohra** et **ZEHOUANI Mohamed Aymen**, je suis extrêmement reconnaissant de les avoir eus à mes côtés tout au long de ce processus. Ils ont consacré du temps et de l'énergie à lire mon mémoire, à fournir des commentaires constructifs et à m'offrir des conseils judicieux. Grâce à eux, j'ai pu améliorer la clarté, la cohérence et la qualité globale de mon travail.

Pour finir je remercie **Nadège, Amina et Ali** pour leur présence quotidienne à mes côtés, pour leur soutien moral, leurs conseils et leur aide inestimable et primordiale.

## Dédicaces

Je dédie humblement ce modeste travail à :

Mes chers parents, ma mère et mon père, qui sont la source de lumière dans ma vie, pour leur patience, leur amour inconditionnel, leur soutien indéfectible et leurs encouragements. Ils ont été le pilier essentiel qui a donné un sens profond à mon existence.

A mes sœurs, dont le soutien constant m'a été précieux.

A tous mes ami(e)s, anciens et nouveaux, que j'ai eu la chance de connaître et de rencontrer au cours des six derniers mois.

A toutes les personnes qui œuvrent pour le bien de l'humanité, dont la dévotion et le travail inspirant sont une source d'inspiration pour moi.

# Sommaire

<b>Introduction générale.....</b>	<b>1</b>
-----------------------------------	----------

## CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

<b>I INTRODUCTION .....</b>	<b>3</b>
<b>II CRISTAUX LIQUIDES.....</b>	<b>3</b>
II.1 HISTORIQUE.....	3
II.2 DEFINITION.....	4
II.3 CATEGORIES DE CRISTAL LIQUIDE .....	5
II.3.1 Les cristaux liquides thermotropes .....	5
II.3.2 Les cristaux liquides lyotropes .....	6
II.3.3 Les cristaux liquides amphotropes : .....	6
II.4 LES PHASES DU CRISTAL LIQUIDE .....	6
II.4.1 La phase nématique .....	6
II.4.2 La phase smectique.....	7
II.4.3 La phase cholestérique (N*) : .....	7
II.5 LES CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DES MESOPHASES .....	8
II.5.1 L'anisotropie diélectrique.....	8
II.5.2 La biréfringence d'un nématique.....	8
II.6 LE RECYCLAGE DES CRISTAUX LIQUIDES .....	9
II.7 LES APPLICATIONS DES CRISTAUX LIQUIDES .....	10
<b>III LES POLYMERES .....</b>	<b>12</b>
III.1 DEFINITION.....	12
III.2 LES RESEAUX DE POLYMERES .....	12
III.3 LA FONCTIONNALITE .....	12
III.4 SYNTHESE DES POLYMERES .....	13
III.4.1 La polycondensation : .....	13
III.4.2 La polymérisation en chaîne : .....	13
III.5 LES APPLICATIONS DES POLYMERES : .....	14

<b>IV LES CRISTAUX LIQUIDES DISPERSÉS DANS UNE MATRICE POLYMERÉ (PDLC) .....</b>	<b>15</b>
IV.1 HISTORIQUE.....	15
IV.2 DÉFINITION.....	15
IV.3 ELABORATION DES MATÉRIEAUX PDLC.....	15
IV.3.1 La micro-encapsulation : .....	15
IV.3.2 La séparation de phase.....	16
IV.4 PROPRIÉTÉS ÉLECTRO-OPTIQUES .....	17
IV.5 APPLICATIONS DES PDLC .....	18
IV.5.1 Les vitrages à opacité contrôlée .....	19
IV.5.2 La visualisation.....	19
<b>V DIAGRAMME DE PHASE DE TYPE UCST .....</b>	<b>19</b>
<b>VI CONCLUSION.....</b>	<b>20</b>

<b>CHAPITRE II : MATÉRIEAUX ET MÉTHODES</b>
---

<b>I INTRODUCTION :.....</b>	<b>21</b>
<b>II MATÉRIEAUX UTILISÉS.....</b>	<b>21</b>
II.1 POLYMERÉ.....	21
II.2 CRISTAL LIQUIDE.....	23
II.3 MONOMÈRE .....	24
II.4 PHOTOINITIATEUR : .....	25
<b>III PRÉPARATION DES MÉLANGES .....</b>	<b>26</b>
III.1 MÉLANGES SYSTÈME P-2-EHA /CLR.....	26
III.2 PRÉPARATION FILM PDLC .....	28
<b>IV TECHNIQUES D'ANALYSES EXPÉRIMENTALES .....</b>	<b>29</b>
IV.1 ANALYSE SPECTROSCOPIQUE INFRAROUGE À TRANSFORMÉE DE FOURIER (FTIR) 29	
IV.1.1 Introduction .....	29
IV.1.2 Principe.....	29
IV.1.3 Matériel.....	30
IV.2 ANALYSES CALORIMÉTRIQUE DIFFÉRENTIELLE (DSC).....	31

IV.2.1 Principe.....	31
IV.2.2 Matériel.....	31
IV.2.3 Caractérisation des matériaux.....	32
IV.3 ANALYSE THERMO-OPTIQUE : MICROSCOPIE OPTIQUE A LUMIERE POLARISEE (MOP) :.....	32
IV.3.1 Dispositif et principe : .....	32
IV.3.2 Mesure et morphologie :.....	33
<b>V CONCLUSION .....</b>	<b>34</b>

## CHAPITRE III: RESULTATS ET DISCUSSION

<b>I INTRODUCTION .....</b>	<b>33</b>
<b>II CARACTERISATION PAR SPECTROSCOPIE INFRAROUGE A TRANSFORMEE DE FOURIER (FTIR).....</b>	<b>33</b>
<b>III ANALYSE ENTHALPIQUE DIFFERENTIELLE (DSC) .....</b>	<b>37</b>
III.1 LA VARIATION DES TEMPERATURES DE TRANSITION SMECTIQUE ET NEMATIQUE-ISOTROPE DU CLR .....	<b>ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.</b>
<b>IV ANALYSE MORPHOLOGIQUE PAR MICROSCOPIE OPTIQUE A LUMIERE POLARISEE (MOP) .....</b>	<b>39</b>
IV.1 ETUDE DE LA MORPHOLOGIE .....	40
IV.1.1 Texture du cristal liquide recyclé : .....	40
IV.1.2 Variation de la morphologie en fonction de la composition .....	41
IV.1.3 Variation de la morphologie en fonction de la température .....	43
IV.1.4 Comparaison entre les systèmes p-2EHA/E7 et p-2EHA/CLR.....	44
IV.2 DIAGRAMME DE PHASES PAR MOP.....	46
IV.2.1 Diagrammes de phases du système p-2EHA/CLR .....	46
IV.2.2 Diagrammes de phases finaux .....	49
<b>V CHAUFFAGE DU FILM PDLC.....</b>	<b>49</b>
<b>VI CONCLUSION .....</b>	<b>51</b>
ANNEXE .....	55

## Liste des figures

<b>Figure I. 1:</b> Les chercheurs Friedrich Reinitzer et Otto Lehmann [5].	4
<b>Figure I. 2:</b> Organisation des CLs dans les principales mésophases	5
<b>Figure I. 3:</b> Cristaux liquides thermotropes [9].	6
<b>Figure I. 4:</b> Arrangement des molécules dans les différentes mésophases d'un cristal liquide calamitique[12].	8
<b>Figure I. 5:</b> Description de l'indice de réfraction moyen $n$ d'une gouttelette de cristal liquide.	9
<b>Figure I. 6:</b> Forme des différents types des polymères.	12
<b>Figure I. 7:</b> Schéma de la micro encapsulation.	16
<b>Figure I. 8:</b> Schématisation Méthodes de préparation d'un film PDLC.	17
<b>Figure I. 9:</b> Film PDLC : A) état OFF, B) état ON, C) champ électrique retiré. ...	18
<b>Figure I. 10:</b> Application PDLC sur les vitrages à opacité contrôlée.	19
<b>Figure II. 1 :</b> Flacon p-2-EHA [Sigma Aldrich]	22
<b>Figure II. 2:</b> Structure chimique de p2-EHA [Sigma Aldrich]	22
<b>Figure II. 3:</b> Chromatogramme du p-2EHA par GPC [8].	23
<b>Figure II. 4:</b> Pilulier cristal liquide recyclé	23
<b>Figure II. 5:</b> Structure chimique du monomère TPGDA.	25
<b>Figure II. 6 :</b> Structure chimique du Darocur 1173.	26
<b>Figure II. 7:</b> Balance analytique	27
<b>Figure II. 8:</b> à gauche) Agitateur mécanique à droite) Etuve	28
<b>Figure II. 9:</b> Chambre UV	28
<b>Figure II. 10:</b> Spectroscopie Infrarouge à transformée de Fourier.	30
<b>Figure II. 11:</b> Analyse calorimétrique différentielle à balayage (DSC) Q2000	31
<b>Figure II. 12:</b> Cycle thermique DSC	32
<b>Figure II. 13:</b> Illustration de l'appareillage MOP utilisé	33
<b>Figure II. 14:</b> Cycle de chauffage et de refroidissement utilisé pour l'analyse MOP.	34

<b>Figure III. 1:</b> Spectre infrarouge du p-2-EHA .....	34
<b>Figure III. 2:</b> Spectre infrarouge du CLR.....	35
<b>Figure III. 3:</b> Superposition spectres système p-2-EHA/CLR a différent % en CLR avec zoom sur différentes bandes caractéristiques du mélange.....	36
<b>Figure III. 4:</b> Thermogramme DSC du cristal liquide recyclé [21] .....	38
<b>Figure III. 5:</b> Thermogramme des systèmes p-2-EHA/CLR à différentes proportions en volume de CL lors du deuxième chauffage .....	38
<b>Figure III. 6:</b> Variation de la température de transition nématique-isotrope et de la température smectique de CLR en fonction de sa concentration massique.....	<b>Error!</b>
<b>Bookmark not defined.</b>	
<b>Figure III. 7:</b> Photos MOP du cristal liquide recyclé pur.....	40
<b>Figure III. 8:</b> Photos MOP du cristal liquide E7 pur [8]. .....	41
<b>Figure III. 9:</b> Texture des échantillons de p-2EHA/CLR à différentes concentrations observées à 25°C : Etat nématique-isotrope (10X).....	43
<b>Figure III. 10:</b> Morphologie des échantillons observés par MOP, pour le système p-2EHA/CLR (50/50) à plusieurs températures (grossissement 10X). .....	44
<b>Figure III. 11:</b> Texture des échantillons de p-2EHA/E7 à différentes concentrations observées à 58°C : Etat nématique-isotrope (10X) [8].....	45
<b>Figure III. 12:</b> Texture des échantillons de p-2EHA/CLR à différentes concentrations observées à 58°C : Etat nématique-isotrope (10X). .....	46
<b>Figure III. 13:</b> Evolution de la transition (N-I) du mélange p-2EHA/CLR déterminée lors de refroidissement et de chauffage : A] tous les points début et fin de $T_{NI}$ refroidissement, B] tous les points début et fin de $T_{NI}$ chauffage, C] moyenne de début et fin de $T_{NI}$ refroidissement, D] moyenne de début et fin de $T_{NI}$ chauffage, E] $T_{NI}$ refroidissement, F] $T_{NI}$ chauffage. ....	48
<b>Figure III. 14:</b> A] Diagramme de phases du p-2EHA/CLR refroidissement + chauffage, B] Diagramme de phases final du p-2EHA/CLR. ....	49
<b>Figure III. 15:</b> Superposition du $T_{NI}$ obtenu par MOP et DSC. ....	49
<b>Figure III. 16:</b> Effet de la température sur le film PDLC.....	50

## **Liste des tableaux**

<b>Tableau II. 1:</b> Les paramètres caractéristiques du p2-EHA.....	22
<b>Tableau II. 2:</b> Les paramètres caractéristiques du monomère TPGDA .....	25
<b>Tableau II. 3:</b> les formulations préparées.....	26
<b>Tableau III. 1:</b> Les bandes d'absorption caractéristiques p-2-EHA .....	34
<b>Tableau III. 2:</b> Les bandes d'absorption caractéristiques du CLR.....	35

## **Liste d'abréviation et acronymes**

**CL** : Cristal liquide

**CLR** : Cristal liquide recyclé d'écrans LCD

**E7** : CL nématique : mélange eutectique

**DSC** : Analyse Enthalpique Différentielle (Differential Scanning Calorimetry)

**FTIR** : Infra-Rouge à Transformée de Fourier

**MOP** : Microscopie Optique à lumière Polarisée

**P-2EHA**: poly (2-Ethyl Hexyl acrylate)

**PDLC** : Cristal liquide dispersé dans une matrice polymère

**PIPS** : Séparation de phase induite par polymérisation

**SIPS** : Séparation de phase induite par évaporation du solvant

**TIPS** : Séparation de phase induite thermiquement

**T<sub>g</sub>** : Température de transition vitreuse

**T<sub>NI</sub>** : Température de transition Nématique-Isotrope

**Darocur 1173**: 2-hydroxy-2-méthyl-1-phényl-propane-1-one.

**LCD** : Liquid Crystal Display.

**DEEE** : Déchets d'équipements électriques et électroniques

**EEE** : Equipements électriques et électroniques

**UV** : Ultra-Violet.

**$\Delta\epsilon$** : Anisotropie diélectrique.

$\epsilon_{\perp}$  : Constante diélectrique mesurée perpendiculairement.

$\epsilon_{//}$  : Constante diélectrique mesurée parallèlement.

$\Delta n$  : Biréfringence.

$n_e$  : Indice de réfraction extraordinaire.

$n$  : Indice de réfraction ordinaire.

**INTRODUCTION**  
**GENERALE**

Cette étude s'inscrit dans la lignée des recherches menées au sein de notre Laboratoire de Recherche sur les Macromolécules, à l'université de Tlemcen en Algérie, portant sur la création et la description des matériaux composites polymère/cristal liquide.

Les matériaux à base de cristaux liquides ont suscité un intérêt croissant dans divers domaines, tels que l'électronique, l'affichage et l'optique, en raison de leurs propriétés uniques et de leurs applications prometteuses. Cependant, la gestion des déchets électroniques et la durabilité environnementale sont également des préoccupations majeures de notre époque. C'est pourquoi le recyclage des matériaux à base de cristaux liquides est devenu une priorité afin de réduire l'impact environnemental de ces technologies.

Le recyclage des cristaux liquides présente des défis particuliers en raison de la complexité de ces matériaux. Les écrans à cristaux liquides en fin de vie contiennent une multitude de composés, tels que des cristaux liquides nématiques, des cristaux liquides smectiques et des additifs chimiques, qui nécessitent un traitement adéquat pour permettre leur réutilisation de manière efficace et responsable.

Dans notre étude, nous utilisons des systèmes polymère/CL dans lesquels la matrice est linéaire et notre cristal liquide est recyclé à partir d'écrans LCD. Une classification des PDLC a été établie en fonction de la variété structurale des CL présents dans le substrat tels que les PDLC de type réseau ou les PDLC de type gouttelettes avec des distributions LC dispersives dans le polymère [1, 2]. Ces matériaux composites composés de gouttelettes micro-dimensionnées de cristaux biréfringents, dispersées de manière aléatoire dans une matrice polymère optiquement transparente et homogène « PDLC » (Polymer Dispersed Liquid Crystals) [3, 4], présentent un intérêt particulier en raison de leurs propriétés électro-optiques. Les films PDLC peuvent passer d'un état opaque à un état complètement transparent en présence d'un champ électrique ou magnétique appliqué [5, 6], ou en appliquant une source de chaleur.

Nous aborderons également les méthodes de caractérisation utilisées pour évaluer les propriétés des mélanges, telles que la spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR), la calorimétrie différentielle à balayage (DSC), la microscopie optique à lumière polarisée (MOP). Ces techniques nous permettront d'obtenir une meilleure compréhension de la structure, la phase et les propriétés des mélanges de cristaux liquides recyclés et de polymères.

Nous avons consacré trois chapitres à ce travail :

## INTRODUCTION GENERALE

Le premier chapitre de ce mémoire se concentre principalement sur l'introduction des cristaux liquides et des polymères. Une attention particulière est accordée aux matériaux PDLC comprenant leur fabrication et leurs domaines d'application.

Dans le deuxième chapitre, nous présenterons les matériaux utilisés et les méthodes de fabrication des mélanges polymère/cristal liquide. Nous décrirons les techniques expérimentales en expliquant les principes de fonctionnement de chacune d'entre elles, ainsi que les procédures analytiques mises en place pour l'analyse.

Dans le troisième chapitre, nous exposerons et discuterons les résultats expérimentaux obtenus. En établissant notamment les diagrammes de phases à l'aide de la microscopie optique à lumière polarisée MOP et de l'analyse enthalpique différentielle DSC.

En conclusion, nous résumons les points clés de notre étude et soulignons leur importance. Nous identifions également des perspectives prometteuses qui pourraient servir à des points de départ pour de futures recherches dans ce domaine.

# **Chapitre I**

## **Etude bibliographique**

## **Introduction**

Le présent chapitre vise à aborder les concepts clés associés aux cristaux liquides et à rappeler les caractéristiques du cristal liquide recyclé issu des écrans LCD, ainsi que des composites polymères/cristaux liquides. Dans un premier temps, nous offrons une présentation générale des différentes phases et mésogènes des cristaux liquides, ainsi que de leurs propriétés physico-chimiques. Ensuite, nous exposons les multiples caractéristiques et propriétés du cristal liquide recyclé. Enfin, nous mettons l'accent sur les différentes méthodes utilisées pour préparer les films contenant des cristaux liquides dispersés dans une matrice polymère (PDLC).

## **Cristaux liquides**

### **2.1 Historique**

L'étude des cristaux liquides a débuté en 1850 lorsque W. Heinzl a observé que la stéarine fondait en un liquide trouble à 52°C et devenait transparente à 62,5°C.

En 1877, Otto Lehmann [7] a utilisé un microscope à lumière polarisée avec un système à température échelonnée pour observer les phases de transition de certaines substances et a trouvé que l'une d'elles passait par une phase liquide trouble pendant la transition liquide/solide. Il a remarqué aussi que cette phase trouble était optiquement anisotrope (terme que nous définirons plus tard) et qu'elle possédait simultanément des propriétés d'un liquide (fluidité, formation de gouttelettes, coalescence des gouttes par contact, etc.) et des propriétés d'un cristal solide. Mais Lehmann a pensé que ceci était une simple phase d'imperfection.

Ce constat est restauré en 1888 par le botaniste autrichien Friedrich Reinitzer [8], qui a noté un phénomène similaire se produisant dans les substances organiques semblables au cholestérol.

C'est seulement à partir de 1958, suite à un article de Glenn Brown dans Chemical Reviews que la recherche sur les cristaux liquides a officiellement commencé [9].

En 1969, Meyer a proposé une structure de cristaux liquides en gouttelettes, où les molécules ont une orientation précise. Plus tard, Dubois-Violette et Parodi publièrent un

article théorique sur les énergies en jeu dans les différentes configurations de gouttelettes[10].



Figure I. 1: Les chercheurs Friedrich Reinitzer et Otto Lehmann [11].

## 2.2 Définition

Un cristal liquide est un état de la matière caractérisé par plusieurs états intermédiaires entre l'état cristallin - atomes ou molécules occupant une position fixe dans l'espace où l'ordre est total et l'état liquide, où l'ordre est absent [12, 13].

Les cristaux liquides sont des matériaux anisotropes, leurs propriétés sont dépendantes de la direction dans laquelle elles sont mesurées et leur ordre moléculaire en est le principal facteur. Les CLs font partie d'une catégorie de molécules possédant une double « identité ». Ils se comportent à la fois comme un cristal et un liquide, selon leur fluidité et leur ordre [14].

Une phase cristal-liquide, appelée phase mésomorphe ou mésophase, est caractérisée par un certain ordre d'orientation des molécules et un désordre de position au moins partiel (figure I.2). Elles sont généralement :

- D'une forme allongée, plus longue que large.

- Rigides de cœur et composées des groupements aromatiques qui peuvent être isolés sous forme de bi ou ter phényles ou même de naphthalènes. Le groupement central assure le lien entre les aromatiques, il est généralement polarisable.
- Flexibles aux extrémités, les substituants externes peuvent avoir un effet stérique, toutefois, ils assurent un rôle de donneur électronique.

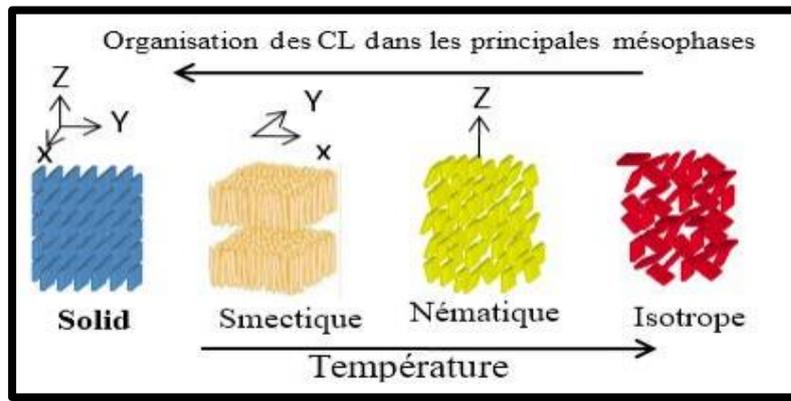


Figure I. 2: Organisation des CLs dans les principales mésophases

## 2.3 Catégories de cristal liquide

Les cristaux liquides se situent entre les solides cristallins et les liquides, avec des propriétés intermédiaires. Contrairement aux solides, ils n'ont pas un ordre de position et d'orientation régulier, mais ils ne sont pas non plus totalement désordonnés comme les liquides. Les cristaux liquides peuvent former différentes mésophases présentant des symétries variées. [14]

Ils peuvent être divisés en trois catégories : thermotrope, lyotrope et amphotrope.

### 2.3.1 Les cristaux liquides thermotropes

Le cristal liquide thermotrope est un système fluide ordonné, constitué d'un agencement d'éléments tels que des atomes, des ions, des molécules, etc., qui peuvent se déplacer librement. Ce type d'organisation est atteint en modifiant une variable d'état intensive, comme la température. Il existe deux types de mésogènes dans ce système : les cristaux liquides calamitiques et les cristaux liquides discotiques.

- ✓ Les cristaux liquides calamitiques sont des molécules rigides en forme de bâtonnet, homogènes dans leur structure, flexibles et non polaires. La partie rigide apporte un ordre cristallin, tandis que la partie flexible permet à la molécule de se déplacer librement.
- ✓ Les cristaux liquides discotiques quant à eux, sont des molécules en forme de disque avec un cœur rigide, généralement un noyau benzénique, et six chaînes flexibles greffées sur ce dernier. Ils ont une structure anisotrope et comprennent au moins deux parties antagonistes. Leurs structures sont présentées dans la figure I.3

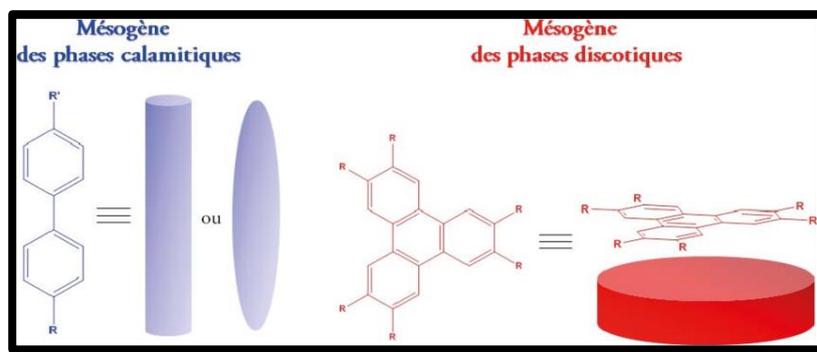


Figure I. 3: cristaux liquides thermotropes[15].

### 2.3.2 Les cristaux liquides lyotropes

Ils sont des substances qui atteignent leur état de cristal liquide en présence de solvant. Ils font partie des amphiphiles, qui possèdent une partie hydrophile et une partie hydrophobe, créant ainsi la formation de micelles. La formation de ces mésogènes dépend de la concentration et de la température.

### 2.3.3 Les cristaux liquides amphotropes :

Quant à eux, ont à la fois les propriétés des thermotropes et des lyotropes. Un exemple bien connu est celui des sels alcalins des acides à longues chaînes aliphatiques[16].

## 2.4 Les phases du cristal liquide

### 2.4.1 La phase nématique

La phase nématique est la phase la plus proche de l'état liquide, la phase désordonnée des cristaux liquides est caractérisée par une absence d'ordre positionnel des molécules, ce

qui signifie que leurs centres de gravité sont répartis de manière aléatoire dans l'espace, leur permettant de se déplacer librement, comme dans les phases liquides. Cette phase est la plus simple et la plus courante des cristaux liquides[14].

### 2.4.2 La phase smectique

La phase smectique et la phase nématique sont similaires en ce sens que les molécules sont alignées le long du même axe directionnel. Cependant, contrairement à la phase nématique, la phase smectique présente un certain degré d'ordre translationnel. Les molécules ont tendance à former des plans ou des calques, créant ainsi un ordre de positionnement (ou translationnel)[17].

On peut citer 3 différentes phases : la phase smectique A (SmA), la phase smectique B (SmB) et la phase smectique C(SmC).

- **La phase Smectique A** : Le directeur est perpendiculaire au plan smectique et il n'y a aucun ordre positionnel particulier dans la couche.
- **La phase Smectique B** : Le directeur est aussi perpendiculaire au plan smectique, mais les molécules dans ce cas sont arrangées dans un réseau d'hexagones dans chaque couche
- **La phase Smectique C** : Dans cette phase les molécules sont arrangées comme dans une mésophase smectique-A, mais le directeur est incliné d'un angle constant par rapport au plan smectique

### 2.4.3 La phase cholestérique (N\*) :

Les cristaux liquides cholestériques, aussi connus sous le nom de « nématiques chiraux », sont constitués de molécules nématiques possédant des centres chiraux. La présence de ces centres chiraux génère des forces intermoléculaires qui orientent les molécules les unes par rapport aux autres selon un angle léger, créant ainsi une structure

hélicoïdale. Cette hélice a un axe principal qui tourne progressivement autour d'un axe vertical appelé axe hélicoïdal[14].

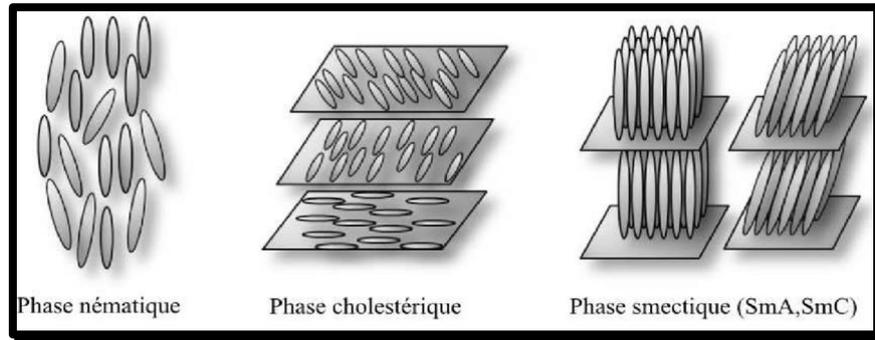


Figure I. 4: Arrangement des molécules dans les différentes mésophases d'un cristal liquide calamitique[18].

## 2.5 Les caractéristiques physiques des mésophases

Les cristaux liquides présentent une forte anisotropie en raison de leur forme moléculaire et de la présence de groupements polaires [19]. Cette anisotropie se reflète dans leurs propriétés physiques telles que l'anisotropie optique, diélectrique, électrique, magnétique, etc. [20]

### 2.5.1 L'anisotropie diélectrique

L'anisotropie diélectrique caractérise une propriété intrinsèque qui permet aux molécules de s'auto-orienter sous l'action d'un champ électrique ou magnétique. Nous notons  $\Delta\epsilon = \epsilon_{//} - \epsilon_{\perp}$  où  $\epsilon_{//}$  et  $\epsilon_{\perp}$  sont les constantes diélectriques mesurées parallèlement et perpendiculairement au grand axe du cristal liquide nématique. A  $\Delta\epsilon$  positif, les molécules tournent parallèlement à la direction du champ électrique appliqué, et à  $\Delta\epsilon$  négatif, elles tournent perpendiculairement au champ électrique[14].

### 2.5.2 La biréfringence d'un nématique

L'anisotropie du cristal liquide conduit à une biréfringence dans le système. L'axe optique est donc caractérisé par deux indices de réfraction, extraordinaire et ordinaire.

L'indice anormal est mesuré lorsque l'onde incidente est polarisée parallèlement à la direction du directeur, et l'indice ordinaire est mesuré lorsque l'onde est polarisée perpendiculairement à la précédente [21]. La biréfringence est la différence entre ces deux indices :  $\Delta n = n_e - n_o$ .  $\Delta n$  peut être positif ou négatif.

Pour les gouttelettes de cristaux liquides nématiques, l'indice de réfraction sous un angle  $\alpha$  par rapport à la direction moyenne  $n$  du cristal nématique est donné par la relation suivante :

$$n_{\alpha} = \frac{n_e \times n_o}{(n_e^2 \sin^2 \alpha + n_o^2 \cos^2 \alpha)^{\frac{1}{2}}}$$

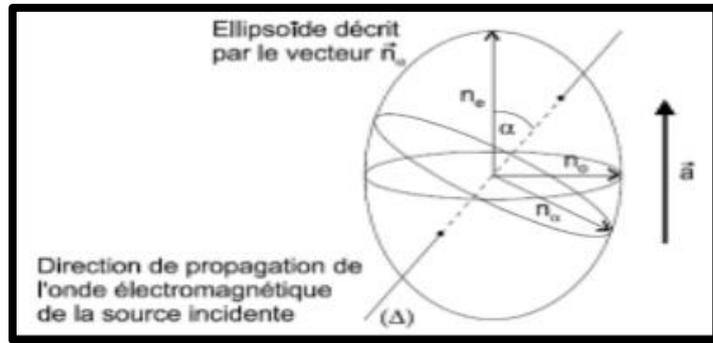


Figure I. 5: Description de l'indice de réfraction moyen  $n$  d'une gouttelette de cristal liquide.

## 2.6 Le recyclage des cristaux liquides

L'utilisation croissante des équipements électriques et électroniques (EEE) est devenue essentielle dans notre vie moderne [22, 23]. Elle a permis à une grande partie de la population mondiale de bénéficier d'un niveau de vie supérieur grâce à leur disponibilité, leur utilisation répandue et leur facilité d'accès [24]. Cependant, nos pratiques actuelles de production, de consommation et de gestion des déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE) ne sont pas durables à long terme [25]. Dans ce contexte, la directive européenne sur les déchets d'équipements électriques et électroniques (2012/19/UE) vise principalement à réduire la production de DEEE et impose notamment le démontage de tous les écrans à cristaux liquides (LCD) d'une surface supérieure à  $100 \text{ cm}^2$ . Ces dispositifs peuvent contenir des substances chimiques dangereuses.

En 2018, la demande d'écrans a connu une croissance continue. Cette demande croissante entraîne une augmentation des déchets lorsque les anciens écrans sont remplacés par des modèles plus récents. À l'exception des remplacements prématurés, la durée de vie moyenne d'un écran LCD est d'environ dix ans [26]. Les télévisions, les ordinateurs et les tablettes utilisant des technologies à cristaux liquides sont composés de matériaux à haute valeur ajoutée, ce qui en fait un enjeu stratégique pour le recyclage [27].

Le recyclage des cristaux liquides des écrans LCD est un processus spécialisé qui nécessite une manipulation appropriée des matériaux potentiellement dangereux. Voici une

description générale des étapes impliquées dans le recyclage des cristaux liquides des écrans LCD :

1. **Collecte** : Les écrans LCD en fin de vie sont collectés à partir de sources telles que les centres de recyclage électronique ou les programmes de collecte spécifiques.
2. **Démontage** : Les écrans LCD sont soigneusement démontés pour accéder aux couches contenant les cristaux liquides. Cela peut impliquer le retrait des panneaux de verre et des composants électroniques, tout en évitant de briser les cellules LCD.
3. **Extraction des cristaux liquides** : Les cristaux liquides sont extraits des panneaux LCD. Ce processus peut être réalisé en utilisant des solvants spécifiques qui permettent de séparer les cristaux liquides des autres matériaux.
4. **Traitement des déchets** : Les déchets générés pendant le processus de recyclage, tels que les solvants utilisés, doivent être traités conformément aux réglementations environnementales en vigueur. Les matériaux récupérés, tels que les cristaux liquides, peuvent être stockés en vue d'une utilisation ultérieure ou être envoyés à des installations spécialisées pour un traitement plus poussé.

Il est important de noter que le recyclage des cristaux liquides des écrans LCD est un processus complexe qui nécessite une expertise et des installations appropriées. Il est essentiel de se conformer aux réglementations environnementales et de prendre les précautions nécessaires pour assurer la sécurité lors de la manipulation de ces matériaux.

### 2.7 Les applications des cristaux liquides

Ces dernières années, l'utilisation des cristaux liquides s'est considérablement développée. Voici quelques exemples :

- La cellule à cristaux liquides est un dispositif d'affichage numérique composée de deux plaques de support en verre reliées par un joint périmétrique, formant une cavité mince remplie de cristaux liquides. Les électrodes peuvent être activées ou désactivées en appliquant une tension externe entre le contact d'accès situé sur la plaque supérieure et le contact situé sur la plaque inférieure.

- Le fonctionnement de l'affichage à cristaux liquides repose sur deux méthodes d'adressage : l'adressage direct, qui est limité aux écrans à faible résolution tels que ceux des calculatrices ou des horloges, et l'adressage matriciel, qui permet de contrôler un plus grand nombre d'adresses pour créer des affichages plus complexes. Cependant, cette méthode nécessite un multiplexage temporel car il n'est pas possible d'adresser en permanence tous les pixels.
- Les cristaux liquides ont une application utile en médecine. Ils sont capables de transformer le rayonnement infrarouge émis par la chaleur corporelle en couleur visible, permettant ainsi de créer une cartographie de la température corporelle. Cette technologie est très utile pour détecter les tumeurs. En outre, les cristaux liquides peuvent générer de la chaleur et rendre visible le flux sanguin dans des conditions extrêmes.
- Les cristaux liquides sont couramment utilisés dans l'industrie car ils peuvent former des films très minces et efficaces à des températures élevées, où les facteurs extérieurs ont peu d'impact. Cette propriété est utile pour identifier les défauts de points chauds dans les circuits électroniques et les problèmes de conductivité thermique dans les métaux. En résumé, les cristaux liquides sont largement utilisés dans l'industrie pour détecter les défauts dans les circuits électroniques et les métaux grâce à leur capacité à former des films minces et efficaces à haute température.
- Les cristaux liquides cholestériques peuvent être utilisés comme détecteurs de température grâce à leur phase cholestérique. Leurs propriétés optiques leur permettent de fonctionner comme des thermomètres, en renvoyant une longueur d'onde lumineuse spécifique en fonction de la longueur du pas hélicoïdal. Cette longueur de pas hélicoïdal dépend de l'angle d'incidence de la lumière et de la structure moléculaire du matériau. Les cristaux liquides ne réfléchissent qu'une couleur spécifique correspondant à une longueur d'onde précise, qui varie en fonction de la température. Ainsi, la couleur renvoyée par le matériau permet de mesurer la température [14].

## Les polymères

### 3.1 Définition

Les polymères sont des matériaux composés de macromolécules, c'est-à-dire, la répétition de plusieurs unités simples de faible masse moléculaire « monomères », liées entre elle par des liaisons covalentes. Lorsqu'un polymère est obtenu à partir de deux monomères différents ou plus, il est appelé copolymère. Dans le cas contraire, on parle d'homopolymère [28].

### 3.2 Les Réseaux de polymères

Les polymères peuvent être linéaires, ramifiés ou réticulés.

- **Polymère linéaire** : Un polymère qui ne contient aucune ramification dans la chaîne principale à part les substituants pendants déjà présents sur le monomère. Ils sont solubles et flexibles.
- **Polymères ramifiés** : ils ont des propriétés similaires aux polymères linéaires en termes de solubilité, mais diffèrent par leur morphologie
- **Polymères réticulés** : Polymères synthétisés à partir de prépolymères linéaires ou ramifiés de bas poids moléculaire qui ont été réticulés par l'action de la chaleur en présence d'un catalyseur. Ils sont insolubles.

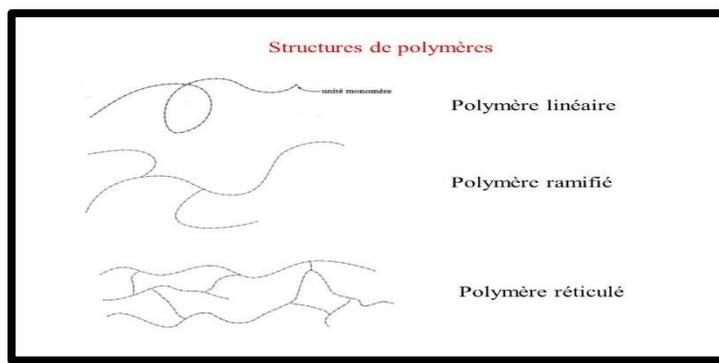


Figure I. 6: La forme des différents types des polymères

### 3.3 La fonctionnalité

La fonctionnalité (nombre de sites réactifs) du monomère est une propriété très importante. Une molécule de monomère contient au moins un groupe fonctionnel. Chaque

groupe contient un ou plusieurs sites réactifs qui peuvent former des liaisons chimiques avec une autre molécule de monomère. C'est le nombre de liaisons potentielles qu'un monomère peut former pendant la polymérisation. Au moins une fonctionnalité égale à 2 ( $f = 2$ ) est nécessaire pour continuer l'extension de la chaîne. En général,  $f$  peut prendre les valeurs suivantes :

- $f = 2$  : c'est le cas des liaisons doubles, des cycles tendus susceptibles de s'ouvrir et des molécules difonctionnelles.
- $f = 3$  : pour les monomères trifonctionnels.
- $f = 4$  : pour des structures portant par exemple deux doubles liaisons [29].

### 3.4 Synthèse des polymères

La synthèse des polymères est appelée polymérisation. Il existe deux principales méthodes de synthèse : la polycondensation et la polymérisation en chaîne.

#### 3.4.1 La polycondensation :

La polycondensation est également appelée "polymérisation par étapes". La formation de macromolécules se fait par des réactions de condensation successives entre des groupes fonctionnels chimiques de monomères bifonctionnels ou multifonctionnels. Ces réactions impliquent l'élimination de petites molécules, généralement de l'eau. Au cours de la polymérisation, les chaînes s'agrandissent, soit par addition de monomères soit par ajout d'oligomères. Cette polymérisation est longue et peut prendre plusieurs heures [30].

#### 3.4.2 La polymérisation en chaîne :

La polymérisation radicalaire est une réaction en chaîne avec plusieurs étapes :

- Amorçage : formation des centres actifs
- Propagation : addition des monomères en bout de chaîne, accompagnée d'une régénération du site terminal actif
- Transfert : transfert d'un centre actif à une autre molécule
- Terminaison : destruction des centres actifs. [14]

### 3.5 Les applications des polymères :

Les polymères ont conquis tous les domaines de notre quotidien. Pour cela, les exemples suivants ne donnent qu'une vision très limitée de la réalité.

- Vêtements et textiles : fibres naturelles et synthétiques, tissus non tissés, cuir artificiel
- Maroquinerie - Chaussures : simili cuir, mousse isolante.
- Ameublement : simili cuir, colle, vernis, mousse
- Articles ménagers : poubelles, seaux, vaisselle
- Sports et loisirs : cannes à pêche, coques, piscines, bandes magnétiques, DVD
- Emballages alimentaires : bouteilles, pots de yaourt, cartons de lait, cartons d'œufs.
- Emballage à usage industriel : bouteilles de détergent, sacs et sachets, casiers, sacs poubelles
- Transport, automobiles : boucliers, carrosseries, optiques, tableaux de bord, pièces intérieures, réservoir de carburant
- Industrie électrique et électronique : coffrets, gaines de câbles, façades TV.
- Industrie chimique : tuyaux, réservoirs, revêtements
- Travaux publics : peintures, isolation, sols, canalisations, géotextiles
- Agriculture : irrigation, serres, bâches
- Hygiène : lunettes, lentilles de contact, prothèses, matériel hospitalier (seringues, sacs, tubulures de perfusion), couches. [14]

## **Les cristaux liquides dispersés dans une matrice polymère (PDLC)**

### **4.1 Historique**

En 1981, Ferguson a déposé une demande de brevet faisant référence à un nouvel effet électro-optique dans un système à cristaux liquides dispersés à matrice polymère (PDLC). En 1982, Craighead et al ont lancé un système de diffusion utilisant une membrane poreuse remplie de CL. Au repos, le système était très diffusant, mais en présence d'un champ électrique Le film est devenu relativement transparent lorsqu'il est appliqué

Doane et al [31] ont proposé en 1985 une méthode de fabrication de films PDLC utilisant le principe de séparation de phase. Une colle époxy en deux composants a été mélangée avec le cristal liquide pour former un mélange isotrope. Au fur et à mesure que la colle durcit, le cristal liquide se sépare de la phase solide du polymère en croissance, formant des gouttelettes en suspension à l'intérieur de la matrice polymère. Ce type d'échantillon avait les mêmes caractéristiques de base que cet échantillon fait par émulsion. Cependant, quelques différences subtiles ont pu être observées.

### **4.2 Définition**

Ces matériaux sont constitués d'une matrice solide plus ou moins souple dans laquelle sont dispersées des gouttelettes de cristaux liquides. Ils peuvent différer par leur structure et leurs propriétés, selon la nature des deux composants, cristal liquide et polymère, et la teneur de chacun de ces composants [32].

### **4.3 Elaboration des matériaux PDLC**

Nous utilisons principalement deux méthodes pour préparer les PDLC : l'émulsion (micro-encapsulation) et la séparation de phases.

#### **4.3.1 La micro-encapsulation :**

Les premières tentatives de fabrication de PDLC ont été faites en utilisant une technique connue sous le nom de micro-encapsulation [33]. Dans cette méthode, les cristaux liquides sont mélangés avec des polymères solubles dans l'eau. Cette émulsion est ensuite appliquée sous forme de film et laissée à sécher. Le composite obtenu après évaporation de

l'eau présente une polydispersité élevée par rapport à la taille des inclusions de cristaux liquides. Il n'est également pas anodin d'observer la jonction de plusieurs gouttelettes [12, 33]. Cela peut dégrader les performances électro-optiques des composites résultants. Le principal avantage de cette méthode se caractérise par une faible résolution de CL dans la matrice et une facilité d'utilisation sur de grandes surfaces rigides ou souples comme la fabrication de grandes enseignes lumineuses [34]. L'inconvénient de ce système est la distribution de la taille des gouttelettes et les défauts représentés par les canaux de communication entre différentes gouttes [35].

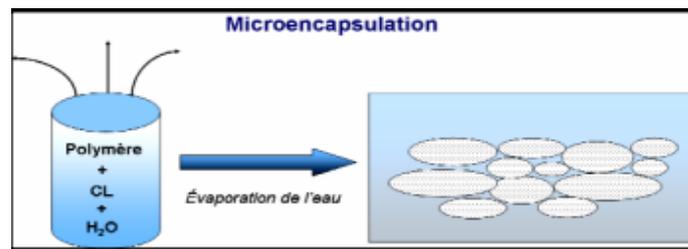


Figure I. 7: Schéma de la micro encapsulation.

### 4.3.2 La séparation de phase

La deuxième classe comprend toutes les méthodes impliquant la séparation de phase des CL et des matrices polymères à partir de solutions homogènes [31]. La principale différence avec la méthode par émulsion se trouve au niveau de la solution de départ, celle-ci se compose d'un mélange homogène miscible de CL et de polymère dissous dans le même solvant. En revanche, la gamme de solvants organiques compatibles avec les deux réactifs est limitée.

Pour ce type de fabrication de PDLC, la séparation de phase peut être induite par trois méthodes différentes : la polymérisation, l'action thermique et l'évaporation du solvant.

#### a. Séparation de phases induite par polymérisation PIPS

Le cristal liquide est mélangé avec un monomère ou un oligomère qui sert de solvant pour le CL. La séparation de phases est provoquée par la polymérisation de monomères (ou d'oligomères) amorcée par le chauffage, la lumière ou par tout type de rayonnement. La séparation de phase se produit par décomposition spinodale, germination ou par croissance de gouttelettes. La croissance de la chaîne polymère crée une matrice dans laquelle les gouttelettes de CL sont principalement séparées [29].

### b. Séparation de phases induite par la température TIPS

Ce processus est réalisé en mélangeant le cristal liquide avec le polymère et en le chauffant à une certaine température afin que la solution devienne isotrope. Au fur et à mesure que le mélange refroidit, une séparation de phase se produit. Les paramètres qui influent ce processus sont principalement les proportions des composants utilisés et la vitesse de refroidissement du mélange [14].

### c. Séparation de phases induite par évaporation de solvant SIPS

Cette méthode est utilisée pour les polymères qui ont des points de fusion supérieurs à leur température de décomposition et qui forment des solutions hétérogènes avec des cristaux liquides. Le mélange polymère/cristal liquide est dissous dans un solvant commun qui homogénéise ce mélange initial. Le solvant est ensuite éliminé par évaporation. Étant donné que les cristaux liquides sont insolubles dans les polymères les phases se séparent avec la formation de gouttelettes se produisent. Le volume des gouttelettes dépend essentiellement de la vitesse d'évaporation du solvant. Bien que cette technique soit assez simple, l'étape d'évaporation du solvant reste délicate [29].

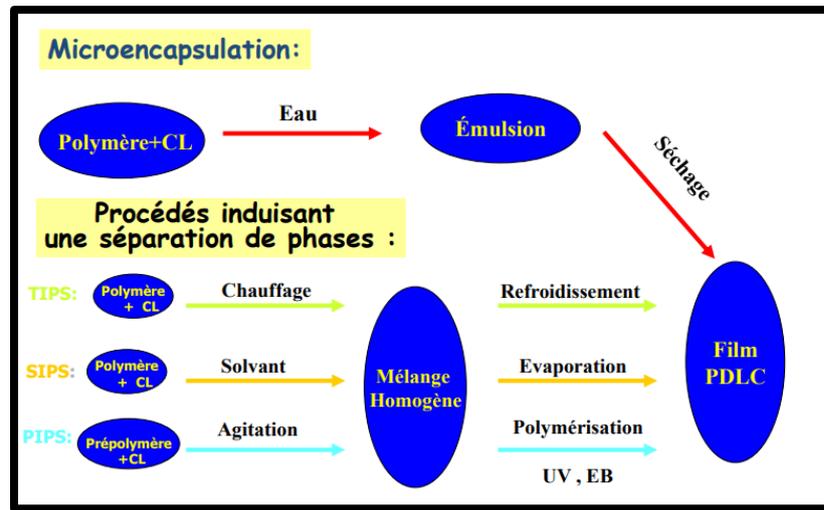


Figure I. 8: Schématisation Méthodes de préparation d'un film PDLC.

## 4.4 Propriétés électro-optiques

La caractéristique la plus remarquable des dispositifs à cristaux liquides polymères (PDLC) est leur capacité à modifier leur transparence en réponse à un champ électrique

externe. Ils peuvent passer d'un état "OFF" opaque à un état "ON" transparent. Cette transition électro-optique est principalement due aux microgouttelettes présentes dans le matériau.

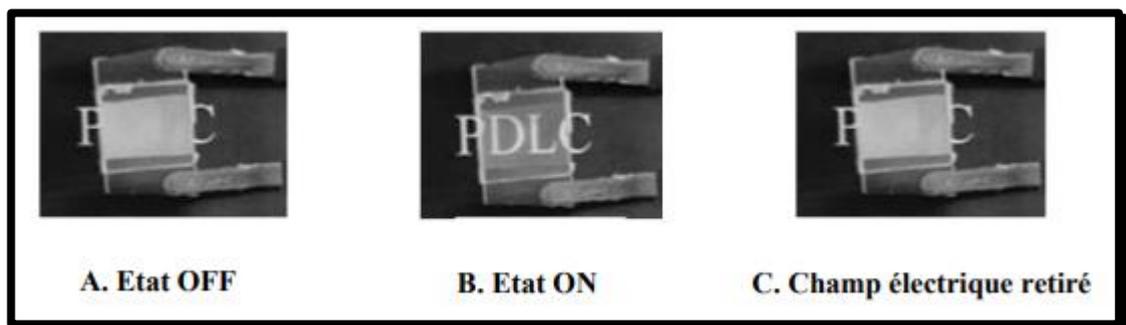
- **Absence du champ appliqué « état OFF »**

Dans cet état, les gouttelettes de cristal liquide présentes dans le film PDLC sont orientées de manière aléatoire. Lorsqu'un faisceau lumineux incident traverse la surface du film PDLC, il rencontre des cristaux liquides ayant des indices de réfraction orientés de manière aléatoire. Cela entraîne une transmission limitée de la lumière à travers la cellule.

- **Application du champ électrique « état ON »**

Lorsqu'une tension est appliquée aux électrodes de l'obturateur, la cellule passe d'un état opaque à un état transparent. Cela est dû à l'orientation des directeurs moléculaires dans la direction du champ électrique appliqué.

Lorsqu'un faisceau lumineux d'indice normal traverse les gouttelettes, son indice de réfraction correspond à  $n_o$ , qui est l'indice ordinaire des molécules de cristal liquide. Si cet indice de réfraction est proche de celui de la matrice polymère, le film apparaît clair et transparent, correspondant à l'état "ON" [36, 37].



**Figure I. 9:** Film PDLC : A) état OFF, B) état ON, C) champ électrique retiré.

## 4.5 Applications des PDLC

La découverte des films PDLC a donné naissance à une nouvelle technologie. Ces produits ont des applications très différentes dans l'optique, les vitrages à opacité contrôlée et les écrans, ces derniers sont les plus recherchés [38].

### 4.5.1 Les vitrages à opacité contrôlée

Le principe de base de cette application est de passer d'un état opaque (sans champ électrique) à un état transparent (avec un champ électrique). Ce vitrage est couramment utilisé dans les bureaux, les banques, les hôtels, les hôpitaux, etc.[38]



Figure I. 10: Application PDLC sur les vitrages à opacité contrôlée.

### 4.5.2 La visualisation

Deux procédés optiques entrent en jeu dans la production d'écrans à base de PDLC, procédés électro-optiques de diffusion et de modulation de l'absorption par des colorants dichroïques incorporés en faibles pourcentages dans le film, cela permet une visualisation des couleurs [39]. Nous notons également que ces composites sont facilement adaptables à la technologie à matrice active en raison de leurs faibles tensions de commande et de leurs temps de réponse compatibles avec la vidéo.

### Diagramme de phase de type UCST

Afin de comprendre les phénomènes qui se produisent lors de la séparation de phase, l'étude du diagramme de phases est indispensable. De nombreux paramètres influent lors du processus de démixtion comme les interactions interfaciales polymère/CL, le paramètre d'ordre des molécules, la diffusion et/ou relaxation moléculaire, l'effet du confinement...

## 5.1 Description de la transition nématique-isotrope

Une phase mésomorphe nématique est un liquide anisotrope dans lequel les molécules glissent parallèlement entre elles. Des observations expérimentales utilisant diverses techniques montrent que le paramètre d'ordre orientationnel diminue de manière monotone dans le domaine mésomorphe et chute à la transition à partir de 0. Bien que la transition (N-I) soit du premier ordre, son comportement thermodynamique indique une faible enthalpie de transition. Cette transition représente une perte d'orientation de 1 degré. De nombreux effets de pré-transition peuvent être identifiés en suivant des propriétés spécifiques thermodynamiques comme la chaleur spécifique et la compressibilité isotherme [14].

### Conclusion

Dans ce premier chapitre, nous avons défini les cristaux liquides, les polymères et les composites PDLC. Tout d'abord, nous avons discuté des cristaux liquides et de leurs différentes phases. Les polymères, leur classification et leurs domaines d'application sont abordés plus loin dans ce chapitre. Ensuite, nous avons discuté en détail des composites PDLC et de la fabrication des films PDLC. Et nous nous sommes beaucoup intéressés à nos matériaux dans leurs nombreuses applications potentielles.

# **Chapitre II**

## **Matériaux et méthodes**

## **I Introduction :**

Dans ce chapitre, nous avons commencé par présenter les différents produits utilisés pour la préparation de nos PDLC suivant la méthode de préparation TIPS. Dans la deuxième partie, nous avons présenté les différentes méthodes de caractérisation utilisées, nous avons défini la méthode de caractérisation de la spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR) qui est utilisée pour déterminer les différentes bandes caractéristiques de notre PDLC. Ensuite, nous nous sommes penchés sur la microscopie optique polarisée qui nous permet de voir la morphologie de nos cristaux liquides à différents temps et différentes concentrations. Pour finir, nous avons utilisé l'analyse enthalpique différentielle (DSC) pour définir nos températures de transition nématique-isotrope.

### **Matériaux utilisés**

Les PDLC utilisés dans ce travail sont constitués d'un polymère acrylique nommé Poly (2-ethylhexyl acrylate) plus fréquemment appelé p-2-EHA acheté chez Sigma Aldrich et de cristal liquide obtenu du recyclage industriel des écrans LC en fin de vie présentant principalement des phases nématiques procurées par l'entreprise de déchet électronique française ENVIE2.

Pour la préparation du film PDLC, nous utilisons le TPGDA fourni par CrayValley (France). Et pour initier la réaction de photopolymérisation nous utilisons le 2- Hydroxy-2-Methyl-1-Phenyl-Propane-1-one connu sous le nom Darocur1173 acheté chez Ciba Geigy.

#### **2.1 Polymère**

Le polyacrylate de 2-éthylhexyle (p-2-EHA) est une substance organique liquide, incolore et moins dense que l'eau. Dans notre cas nous utilisons du p-2-EHA commercial solubilisé dans le toluène

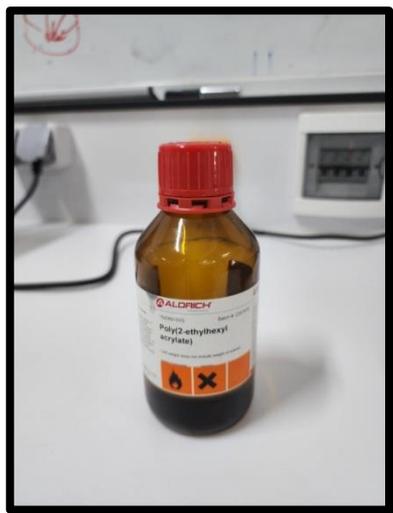


Figure II. 1 : Flaçon p-2-EHA [Sigma Aldrich]

Polymère	p-2-EHA
Formule chimique	$[C_{11}H_{20}O_2]_n$
Poids moléculaire	92,000 g/mol
L'indice de polydispersité	3,00
Densité	0,903 g/mol à 25C°
Température de transition vitreuse	-55°C

Tableau II. 1: Les paramètres caractéristiques du p2-EHA

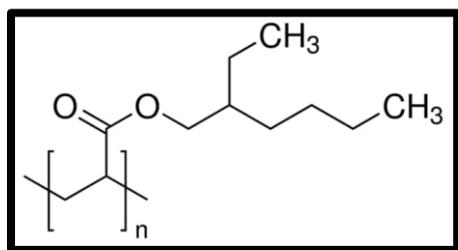


Figure II. 2: Structure chimique de p2-EHA [Sigma Aldrich]

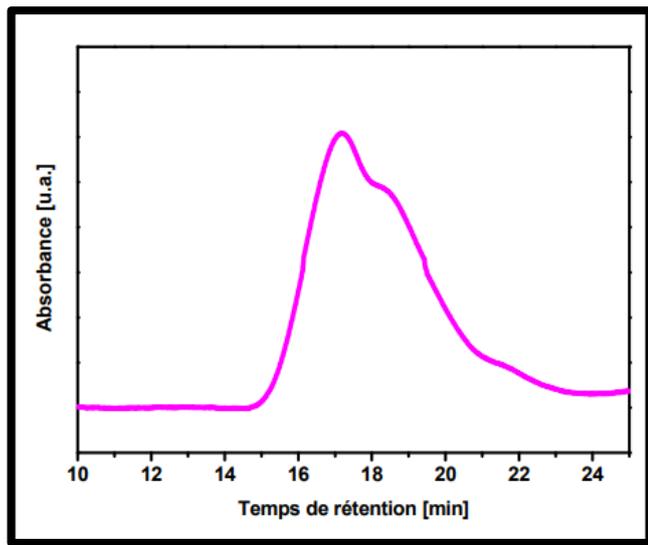


Figure II. 3: Chromatogramme du p-2EHA par GPC [14].

## 2.2 Cristal liquide

Dans le cadre de cette étude, nous avons utilisé deux genres de cristaux liquides :

Le premier est un cristal liquide issu du recyclage industriel d'écrans à cristaux liquides en fin de vie. Ce cristal liquide a été fourni par ENVIE2, une entreprise française spécialisée dans la gestion des déchets électroniques. Il est important de noter que ce matériau recyclé est principalement composé de phases nématiques.

Étant donné que les écrans LCD recyclés ont différentes tailles, compositions et marques, le cristal liquide récupéré est un mélange eutectique de plusieurs cristaux liquides dont on ignore la structure chimique [27].



Figure II. 4: Pilulier cristal liquide recyclé

Le deuxième cristal liquide est le E7, fourni par Merck KG Darmstadt (Allemagne), c'est un mélange eutectique de trois cyanobiphényles et d'un cyanoterphényle qui a été largement étudié. Les structures moléculaires des différents composants du cristal liquide sont présentées dans la Figure II.5. Le Tableau II.1 récapitule les compositions massiques ainsi que les températures de transition nématique-isotrope de chaque constituant [40].

Le E7 présente une biréfringence élevée, avec un indice de réfraction ordinaire de  $n_o = 1,5183$  et un indice de réfraction extraordinaire de  $n_e = 1,7378$  [41]. De plus, il subit une transition de la phase nématique à la phase isotrope à une température de  $58^\circ\text{C}$ , et une transition vitreuse à  $-62^\circ\text{C}$  [42].

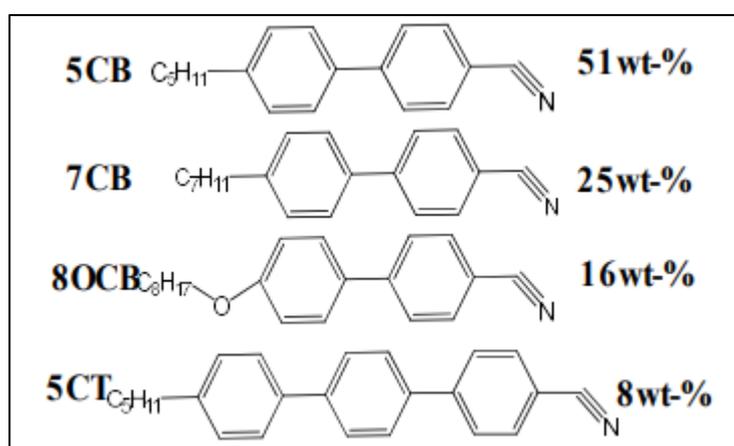


Figure II. 5: Structure chimique cristal liquide E7[43, 44]

Désignation	Formule moléculaire	Nom IUPAC	Composition	T <sub>NI</sub> (°C)
5CB	C18H19N	4-cyano-4'-n-pentyl-biphenyl	51%	35.2
7CB	C20H23N	4-cyano-4'-n-heptyl-biphenyl	25%	42.8
8OCB	C21H25NO	4-cyano-4'-n-oxyoctyl-biphenyl	16%	80
5CT	C24H23N	4-cyano-4'-n-pentyl-biphenyl	8%	240

Tableau II. 2: Composition du cristal liquide E7[14]

### 2.3 Monomère

Nous avons opté pour les acrylates en raison de leur excellente capacité de polymérisation sous l'effet de la lumière et leurs propriétés électro-optiques. Le monomère spécifique utilisé dans cette étude est le tripropylène glycol di-acrylate (TPGDA) avec la

formule chimique  $C_{15}H_{24}O_6$ . Il s'agit d'un monomère acrylique difonctionnel (f=2) fourni par CrayValley (France).

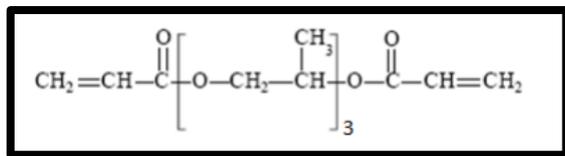


Figure II. 6: structure chimique du monomère TPGDA

Monomère	TPGDA
Formule chimique	$C_{15}H_{24}O_6$
Masse molaire moyenne en poids $M_w$	460 g/mol
Densité	1.03
Température de transition vitreuse	62°C

Tableau II. 3: Les paramètres caractéristiques du monomère TPGDA

## 2.4 Photoinitiateur :

Le Darocur 1173, également connu sous le nom de 2-hydroxy-2-méthyl-1-phénylpropan-1-one, est un liquide transparent largement utilisé comme photoamorceur pour déclencher la réaction de polymérisation. Son rôle principal est de rompre les doubles liaisons carbone-carbone (C=C), ce qui permet au monomère de se transformer en radical libre.

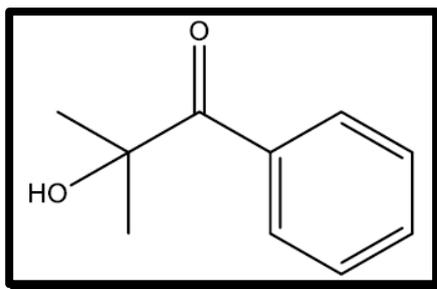


Figure II. 7 : Structure chimique du Darocur1173

## Préparation des mélanges

### 3.1 Mélanges système p-2-EHA /CLR

Nous avons élaboré des mélanges PDLC comprenant différentes compositions en cristal liquide, avec des proportions variant de 10% à 90%.

Tableau II. 4: les formulations préparées.

Formulations	Cristal liquide (m%)	P-2-EHA (m%)
Mélange 1	10	90
Mélange 2	20	80
Mélange 3	30	70
Mélange 4	40	60
Mélange 5	50	50
Mélange 6	60	40
Mélange 7	70	30

Mélange 8	80	20
Mélange 9	90	10

En utilisant une balance analytique, nous avons pesé les différents composés dans des conditions de température et d'atmosphère ambiantes. Par la suite, nous les avons placés dans des piluliers recouverts d'une feuille d'aluminium pour prévenir toute polymérisation incontrôlée.



**Figure II. 8:** Balance analytique

Nous avons utilisé la méthode de séparation de phases induite thermiquement (TIPS) pour élaborer les mélanges polymère/cristaux liquide. Les systèmes p-2EHA/cristal liquide ont été placés dans des piluliers et agités mécaniquement pendant plusieurs heures à température ambiante, jusqu'à ce que tous les mélanges présentent une apparence homogène. Ensuite, ils ont été chauffés dans une étuve jusqu'à ce qu'ils deviennent isotropes. Pour l'observation, nous avons déposé une petite quantité du contenu du pilulier sur une lame de verre préalablement nettoyée.



Figure II. 9: à gauche) Agitateur mécanique à droite) Etuve

### 3.2 Préparation film PDLC

Nous avons préparé deux film PDLC suivant la méthode PIPS sous une lampe UV d'une intensité de  $0,4 \text{ mW/cm}^2$  et  $\lambda = 365 \text{ nm}$ .

**Film CLR :** En utilisant une balance analytique, nous avons pesé 139.5 mg de CLR + 59.5 mg de TPGDA + 1mg de Darocur1173 dans un pilulier dans des conditions de température et d'atmosphère ambiantes que nous avons recouverts d'une feuille d'aluminium pour prévenir toute polymérisation incontrôlée, puis agités mécaniquement pendant plusieurs heures.

Nous avons versé le contenu entre deux lames de verre puis nous le polymérisons sous rayonnement UV pendant 50 min.

**Film E7 :** dans les mêmes conditions et avec les mêmes masses nous avons préparés un film PDLC en remplaçant le CLR par le E7.



Figure II. 10: Chambre UV

## Techniques d'analyses expérimentales

### 4.1 Analyse spectroscopique infrarouge à transformée de Fourier (FTIR)

#### 4.1.1 Introduction

Le FTIR (Fourier Transform Infrared), aussi connu sous le nom de spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier, est une technique de spectroscopie utilisée en chimie et en science des matériaux pour analyser les interactions entre les molécules et les vibrations des atomes dans les échantillons. Le FTIR mesure l'absorption de la lumière infrarouge par un échantillon et produit un spectre qui peut être utilisé pour identifier les composants chimiques d'un échantillon, déterminer leur concentration, étudier leur structure moléculaire, et bien plus encore. Cette technique est largement utilisée dans de nombreux domaines de la recherche scientifique, ainsi que dans l'industrie pour des applications allant de l'analyse pharmaceutique à la caractérisation des matériaux[14].

#### 4.1.2 Principe

Compris entre le visible et les micro-ondes, l'infrarouge se situe entre 4000  $\text{cm}^{-1}$  et 400  $\text{cm}^{-1}$  (2,5 -25  $\mu\text{m}$ ), correspondant au domaine d'énergie de vibration des molécules. Toutes les vibrations ne conduisent pas à l'absorption, cela dépend aussi de la forme de la molécule et de sa symétrie. Les positions des bandes d'absorption dépendent, entre autres, des masses atomiques et de leurs différentes électronégativités. Un matériau de structure et de composition chimique particulière correspond donc à un ensemble de bandes d'absorption caractéristiques permettant son identification.

D'après la loi de Beer-Lambert :  $A = \epsilon \times \ell \times c$

A est l'absorbance,  $I_t$  l'intensité transmise par l'échantillon,  $I_0$  l'intensité incidente,  $\epsilon$  est le coefficient d'extinction molaire ( $\text{L}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}$ ),  $\ell$  est la longueur du trajet optique en cm et c la concentration en espèce absorbante (mol/L).

Le spectre obtenu fournit à la fois des informations qualitatives (les longueurs d'onde auxquelles un échantillon absorbe dépendent des groupes chimiques présents dans le matériau analysé ; le tableau permet d'attribuer l'absorption à différents groupes chimiques) et des informations quantitatives (Les longueurs d'onde caractéristiques sont liées à la transformation des groupes chimiques responsables de l'absorption) [1]. Pour ce travail, le mode FTIR-ATR a été utilisé pour analyser les échantillons afin d'obtenir des informations sur la composition et la structure de l'échantillon analysé. Le principe de fonctionnement consiste en un faisceau infrarouge dirigé selon un angle spécifique vers un cristal optiquement dense avec un indice de réfraction élevé. Cette réflexion interne crée une onde évanescente qui se propage au-delà de la surface du cristal et dans l'échantillon en contact avec le cristal [45]. Les ondes évanescentes sont atténuées dans les régions du spectre IR où l'échantillon absorbe de l'énergie. Le faisceau atténué retourne vers le cristal et sort par l'extrémité opposée vers le détecteur du spectromètre IR. Un détecteur enregistre le faisceau infrarouge atténué sous la forme d'un signal d'interférogramme. Cela peut être utilisé pour générer des spectres infrarouges.

### 4.1.3 Matériel

Nous avons utilisé un spectrophotomètre Agilent technologies modèle Cary 640, en mode réflexion totale atténuée (ATR) à température ambiante. Les ondes infrarouges couvrent une plage allant de 2,5 à 25  $\mu\text{m}$  (de 400 à 4000  $\text{cm}^{-1}$ ) avec une résolution spectrale de 4  $\text{cm}^{-1}$ . Pour chaque échantillon, nous avons appliqué 32 balayages et la mesure a été réalisée indépendamment de l'état physique (solide ou liquide) de l'échantillon.



Figure II. 11: Spectroscopie Infrarouge à transformée de Fourier.

## 4.2 Analyses Calorimétrique Différentielle (DSC)

### 4.2.1 Principe

La calorimétrie différentielle à balayage (DSC) est l'une des techniques d'analyse thermique les plus utilisées pour l'analyse des matériaux PDLC. Son principe repose sur la mesure de la différence entre la quantité de chaleur nécessaire pour élever la température d'un échantillon et la référence en fonction de la température.

Par conséquent, lorsqu'un échantillon subit un changement physique, tel qu'un changement de phase, la quantité d'énergie qui doit être fournie pour maintenir sa température au même niveau que la référence change. La direction de l'échange de chaleur entre le dispositif et l'échantillon dépend de la nature endothermique ou exothermique du changement physique. En mesurant cette différence de flux de chaleur entre la référence et l'échantillon, l'outil DSC peut mesurer la quantité de chaleur absorbée ou libérée pendant la transition. Par conséquent, les changements de phase tels que la cristallisation et la fusion peuvent être détectés. La DSC permet également d'estimer le pourcentage de cristallinité [46] dans les polymères semi-cristallins et est utilisée pour quantifier la fraction massique de cristal liquide qui se sépare entre polymère et cristal liquide, en particulier dans les composites PDLC [38].

### 4.2.2 Matériel

Nous avons utilisé la DSC Q 2000 (TA Instruments) équipée d'un bloc de refroidissement (RCS) (Figure II.11), ce qui nous permet de réaliser des opérations allant de  $-80^{\circ}\text{C}$  à  $400^{\circ}\text{C}$ .



Figure II. 12: Analyse calorimétrique différentielle à balayage (DSC) Q2000

### 4.2.3 Caractérisation des matériaux

- Les échantillons sont mis dans des creusets en aluminium et ont des masses variant de 6 à 9 mg.
- Le programme de température choisi est de -80 à 100°C avec une vitesse de 5°C/min.
- Les différents échantillons analysés sont soumis au cycle de température représenté sur la Figure II. 12
- Le programme consiste à refroidir l'échantillon à une température de -80°C pendant 2 min pour que l'équilibre thermique soit atteint. La température augmente ensuite de -80°C à 100°C avec une vitesse de 5°C/min et reste 2 min à cette température. Enfin, il est refroidi à -80°C à la même vitesse. Ce cycle de chauffage et de refroidissement est répété deux fois, sachant que le premier est appliqué pour effacer l'histoire thermique. Nous tirons la  $T_{NI}$  du deuxième cycle de chauffage.

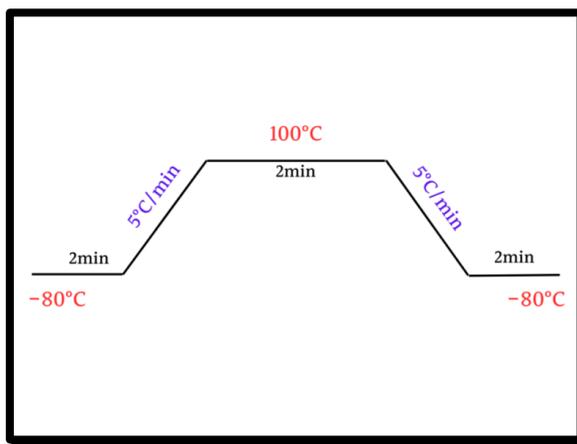


Figure II. 13: Cycle thermique DSC

## 4.3 Analyse thermo-optique : Microscopie Optique à lumière Polarisée (MOP) :

### 4.3.1 Dispositif et principe :

Le MOP est utilisé pour comprendre la morphologie et les transitions de phase des matériaux ayant une structure de taille micrométrique, tels que les PDLC. Ces composites présentent une caractéristique optique importante appelée biréfringence anisotrope, et le MOP utilise cette propriété pour étudier les mésophases et identifier leur nature en examinant

les défauts présents dans le composite. Les informations obtenues grâce au MOP permettent d'établir un diagramme de phases expérimental.

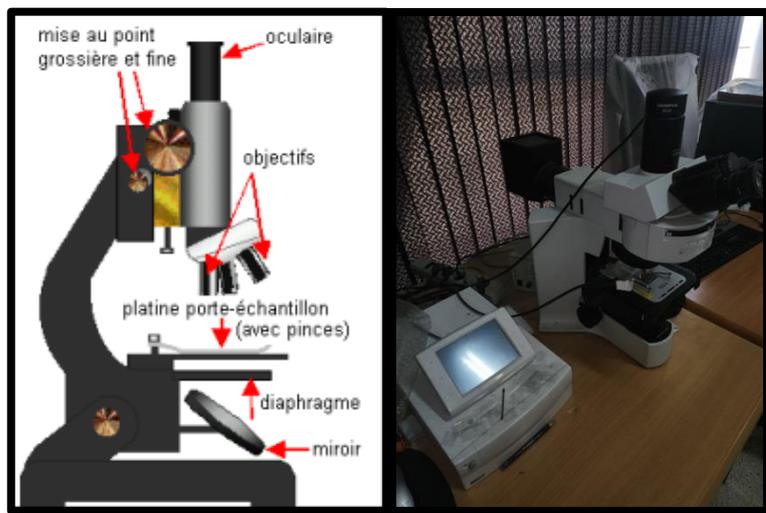


Figure II. 14: Illustration de l'appareillage MOP utilisé

La Figure II.13 illustre le fonctionnement de l'appareil, où une lumière traverse un polariseur pour atteindre l'échantillon (PDLC), produisant ainsi deux composantes (biréfringence) qui passent à travers un analyseur polarisant. Dans cette étude, un OLYMPUS BX41 équipé d'une platine chauffante Pe120 contrôleur 95, d'un système de contrôle de température LINCAM et d'un système vidéo pour la prise de photos a été utilisé. La Figure II.13 présente les différents composants du MOP.

#### 4.3.2 Mesure et morphologie :

Dans le cadre de l'étude des échantillons préparés par la méthode TIPS, le mélange est déposé sur une lame de verre et chauffé à une température de 120°C avec une vitesse de 10°C/min afin d'effacer l'histoire thermique. Après 5min une seconde lame est déposée au-dessus de la première afin d'obtenir un film mince et homogène de l'échantillon à analyser puis notre analyse peut commencer. L'échantillon est soumis à plusieurs cycles de chauffage et de refroidissement selon la figure II.14.

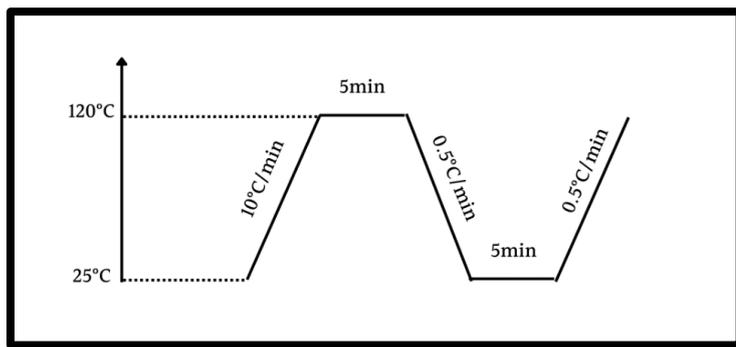


Figure II. 15: Cycle de chauffage et de refroidissement utilisé pour l'analyse MOP

## CONCLUSION

Ce chapitre a été consacré à la présentation des instruments et des méthodes d'analyse nécessaires pour étudier le comportement physico-chimique des systèmes polymères/cristaux liquides. Tout d'abord, nous avons décrit les produits chimiques utilisés. Pour caractériser ces matériaux, nous avons utilisé la spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR) afin d'identifier les différentes bandes caractéristiques correspondant aux groupes chimiques présents. Pour finir Nous avons employé la technique de calorimétrie différentielle et la microscopie optique à lumière polarisée pour établir les diagrammes de phases.

Le chapitre suivant présente les résultats obtenus à l'aide de ces différentes méthodes de caractérisation.

# Chapitre III

## Résultats et discussion

## I Introduction

Ce chapitre présente les résultats obtenus grâce aux techniques d'analyse et aux méthodes de caractérisation des composites élaborés à différentes concentrations en cristal liquide recyclé. Pour commencer, une analyse spectroscopique infrarouge (FTIR) a été réalisée afin d'identifier les différentes bandes caractéristiques des mélanges polymère-cristal liquide. Ensuite, les différents composés ont été étudiés par la calorimétrie différentielle à balayage (DSC). Puis, nous présentons les résultats de la morphologie observée par microscopie optique à lumière polarisée (MOP), ainsi que la construction du diagramme de phases à partir du suivi thermo-optique de la transition nématique/isotrope des composites à différentes concentrations de cristal liquide recyclé (CLR). Pour conclure, nous appliquerons un chauffage à notre film PDLC et verrons le changement d'opacité de ce dernier.

### **Caractérisation par spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR)**

L'analyse spectroscopique est un outil précieux pour identifier les différentes structures chimiques présentes dans nos matériaux. Elle nous permet également de suivre la cinétique de polymérisation des différents systèmes monomériques, que ce soit en présence ou en absence d'un cristal liquide. Figure III.1 représente un spectre infrarouge correspond à l'aup-2-EHA tandis que la Figure III.2 représente le CLR.

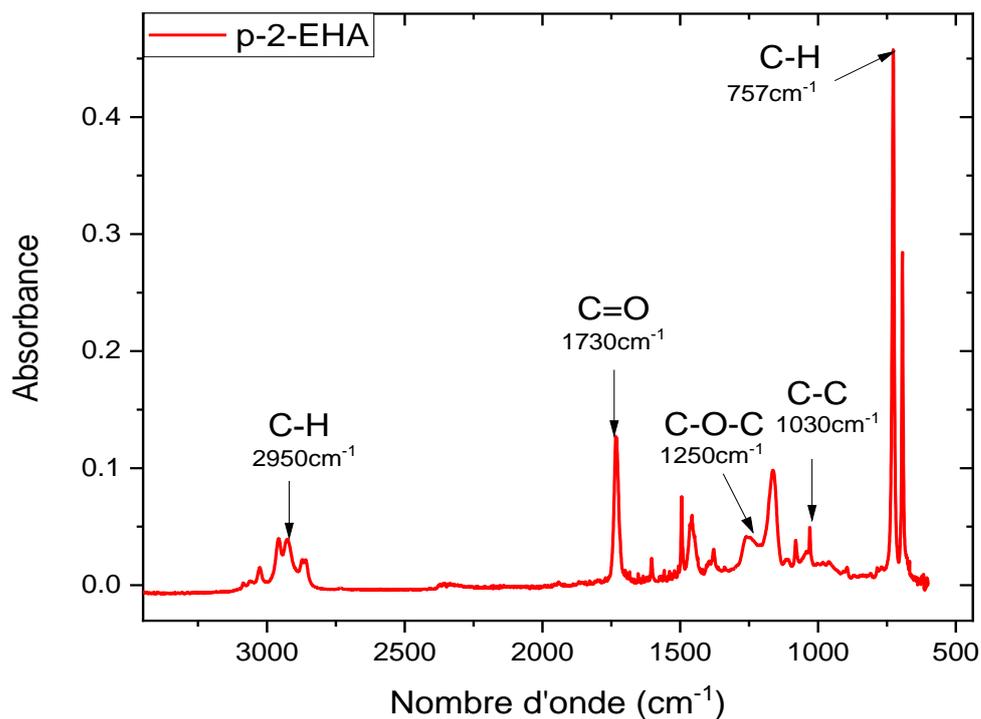


Figure III. 1: Spectre infrarouge du p-2-EHA

Nombre d'onde (cm <sup>-1</sup> )	Nom	Description des vibrations
3000-2850	C-H	Etirement des groupes C-H aliphatiques
1730	C=O	Etirement de la liaison C=O (carbonyle)
1250	C-O-C	Etirement de la liaison C-O-C
1030	C-C	Etirement des liaisons C-C
750	C-H	Flexion des liaisons C-H (toluène)

Tableau III. 1: Les bandes d'absorption caractéristiques p-2-EHA

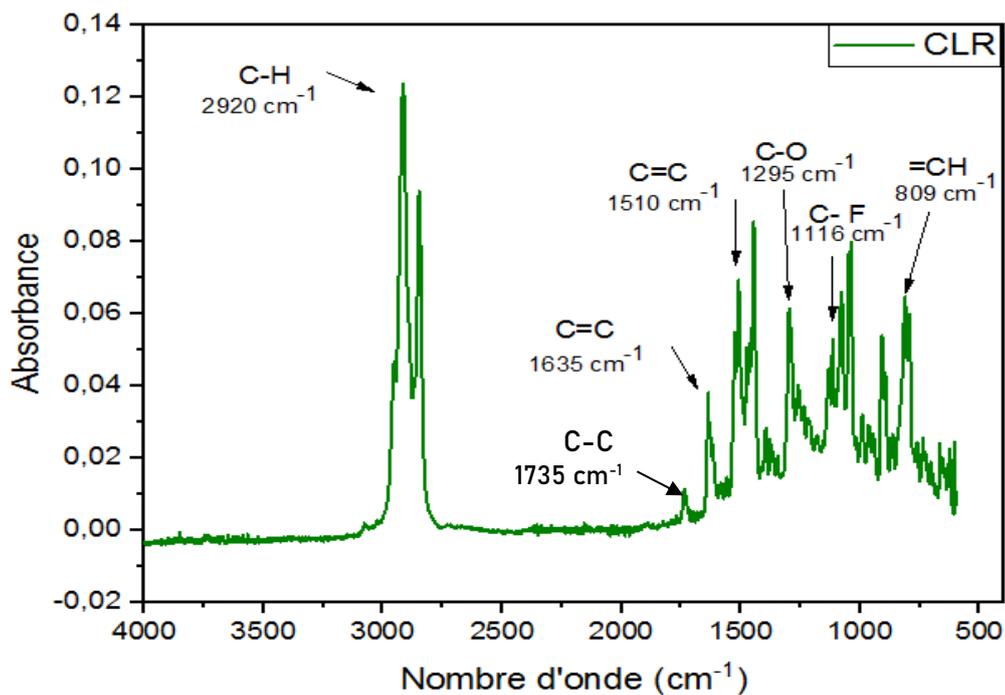
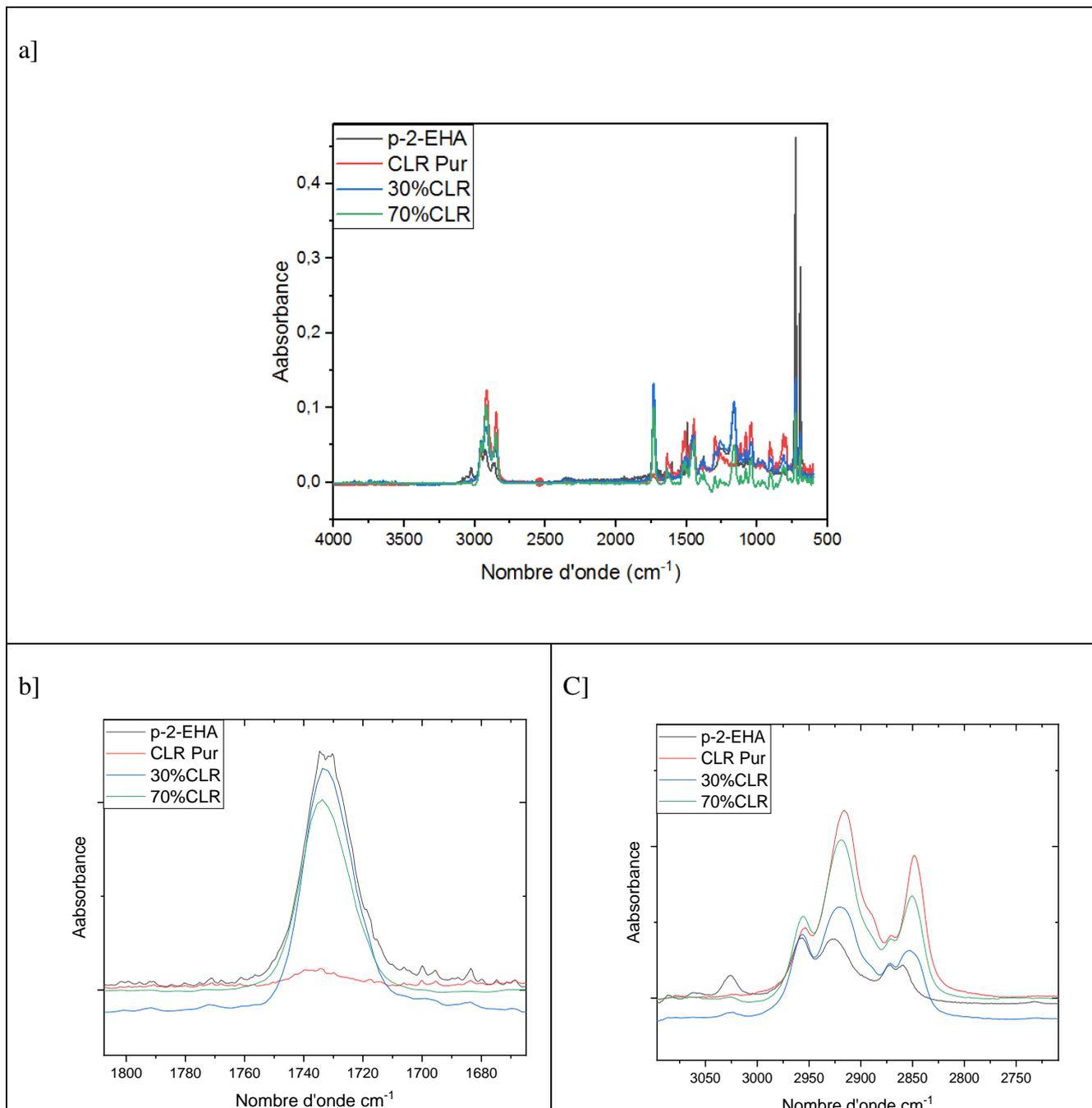


Figure III. 2: Spectre infrarouge du CLR

Nombre d'onde (cm <sup>-1</sup> )	Nom	Description des vibrations
2950-2850	C-H	Etirement des groupes C-H aliphatiques
1635	C=C	Elongation vibration de valence
1600-1500	C=C	Etirement des groupes aromatiques
1295	C-O	Elongation de C-O du Biphényle
830-750	C=C	Déformation du cycle aromatique (disubstitué)
1735	C-O	Elongation de C-O du Biphényle

Tableau III. 2: Les bandes d'absorption caractéristiques du CLR

La figure III.3 (a) nous montre la superposition des spectre FTIR du système p-2-EHA/CLR a différentes concentrations en CLR. Nous remarquons sur la figure III.3 (b) une bande caractéristique du p-2-EHA qui diminue avec l'augmentation du % en CLR dans le système, tandis que la figure III.3 (c) représente une bande caractéristique du CLR où l'intensité du pic diminue avec la diminution du % en CLR dans le système.



**Figure III. 3:** Superposition spectres système p-2-EHA/CLR à différent % en CLR avec zoom sur différentes bandes caractéristiques du mélange

### Analyse enthalpique différentielle (DSC)

En explorant les systèmes PDLC à travers une vaste plage de températures, il est possible d'analyser les propriétés thermodynamiques standards de ces systèmes et leur dépendance à leur composition et de leur structure. Cette approche permet également de mettre en évidence la température de transition.

Le thermogramme obtenu pour le cristal liquide recyclé est illustré dans la figure III.4 il présente trois pics de transition : le premier à  $-90\text{ C}^\circ$  qui représente la transition vitreuse, le deuxième représente une transition smectique à  $-48\text{ C}^\circ$  et pour finir une transition nématique-isotrope à  $70\text{ C}^\circ$  [27]. Afin de garantir une comparaison rigoureuse entre les différents systèmes étudiés, les mêmes paramètres de mesure ont été appliqués pour nos mélanges. La figure III.5 représente les thermogrammes DSC à différentes concentrations en solution du cristal liquide recyclé variant de 50 à 100% en volume de ce dernier. Lors du deuxième cycle de chauffage, deux pics endothermiques sont notés, le premier entre  $-46\text{ C}^\circ$  et  $-48\text{ C}^\circ$ , il correspond à une transition smectique-nématique ( $T_{SN}$ ) du cristal liquide recyclé et son intensité diminue avec la diminution de la quantité de CL dans le mélange. Un décalage de  $3\text{ C}^\circ$  est observé qui peut être expliqué par l'effet de confinement de la matrice [47]. Le deuxième pic a été enregistré entre  $67\text{ C}^\circ$  et  $72\text{ C}^\circ$ , il correspond à la température de transition nématique -isotrope du cristal liquide ( $T_{NI}$ ). Nous remarquons que l'intensité de ce pic aussi diminue avec la diminution de la quantité de CL dans le mélange. Cette faible intensité est due à la faible quantité de CL confinée dans la matrice.

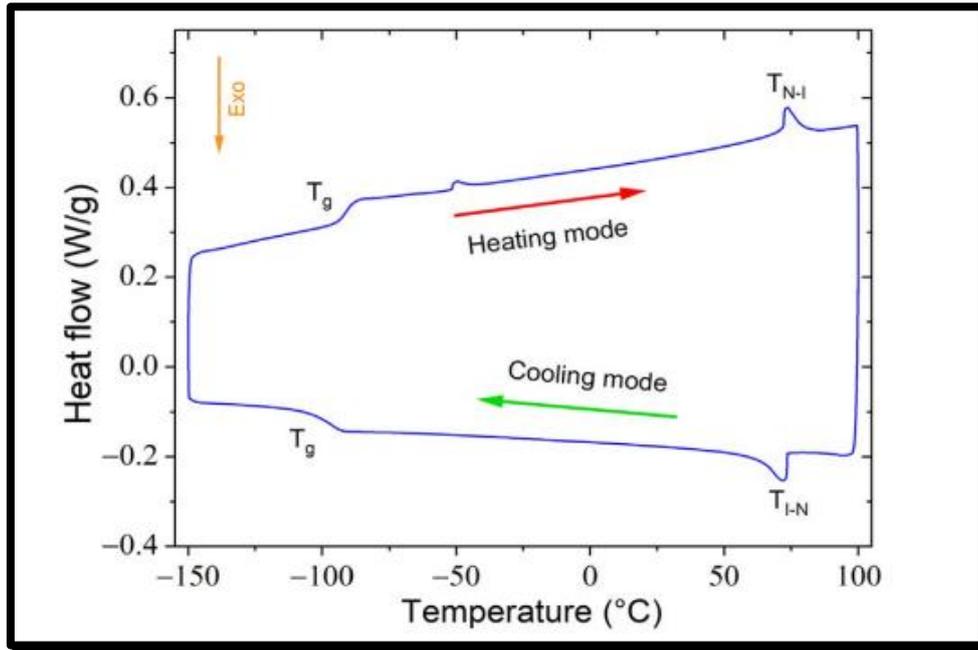


Figure III. 4: Thermogramme DSC du cristal liquide recyclé [27]

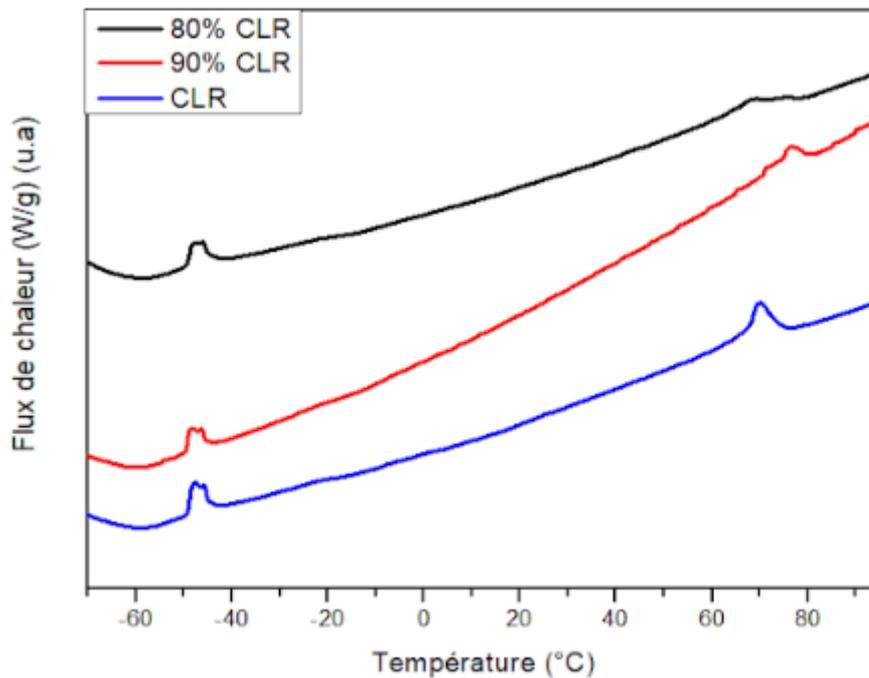


Figure III. 5: Thermogramme des systèmes p-2-EHA/CLR à différentes proportions en volume de CL lors du deuxième chauffage.

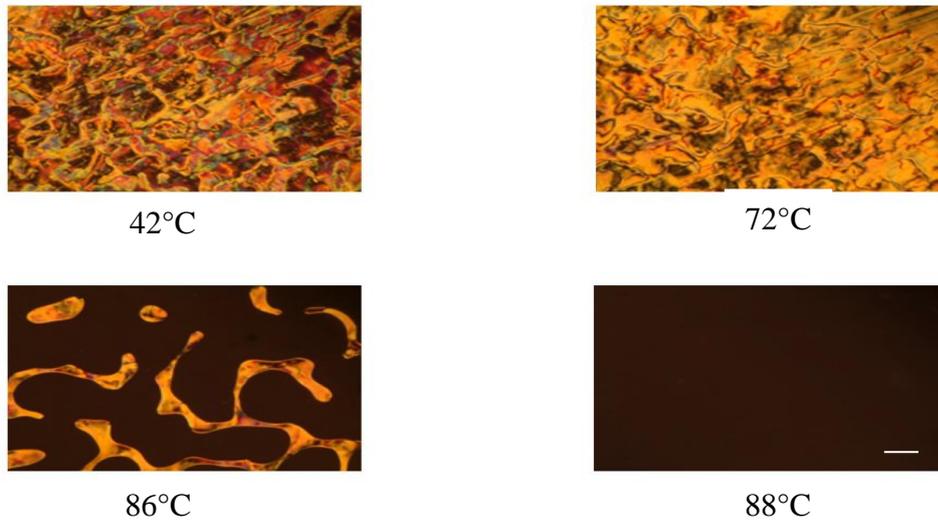
### **Analyse morphologique par microscopie optique à lumière polarisée (MOP)**

L'échantillon a été déposé sur une lame de verre et observé sur MOP. Cette technique permet de visualiser les différentes phases cristal liquide présentes dans l'échantillon. Ensuite l'échantillon a été chauffé rapidement à une vitesse de 10°C/min jusqu'à 120°C. Cette étape a pour but d'effacer l'histoire thermique de l'échantillon à l'état isotrope. L'échantillon a été maintenu à la température de 120 °C pendant 5 minutes. Après, une deuxième lame de verre a été déposée sur l'échantillon. Ce dernier, avec les deux lames de verre, a été refroidi lentement à une vitesse de 0.5 °C/min jusqu'à la température ambiante. Cette étape permet de suivre les transitions de phase et de déterminer les températures de transition lors du refroidissement. Une fois la température ambiante atteinte, l'échantillon a été maintenu pendant 5 min. Enfin l'échantillon a été chauffé jusqu'à 120°C à une vitesse de 0.5 °C/min. cette étape permet de confirmer les températures de transition obtenues lors du refroidissement. Après avoir réalisé ces étapes pour chaque concentration étudiée, les résultats ont été répliqués trois fois pour assurer la reproductibilité. Ensuite, les données obtenues ont été utilisées pour établir un diagramme de phases, qui représente la température en fonction de la composition du cristal liquide recyclé dans le mélange.

## 4.1 Etude de la morphologie

### 4.1.1 Texture du cristal liquide recyclé :

La figure III.6 représente les images prises sous MOP pour le cristal liquide recyclé avec polariseur et analyseur parallèles et un agrandissement 10X. Nous remarquons la présence des couleurs multiples dues au caractère biréfringent du cristal liquide. Les photographies obtenues montrent une texture nématique marbrée entre 67°C et 87°C. À 88°C on observe que le cristal liquide recyclé est à l'état isotrope.



**Figure III. 6:** Photos MOP du cristal liquide recyclé

Il est intéressant de constater une ressemblance morphologique entre le cristal liquide E7 (Figure III. 7).

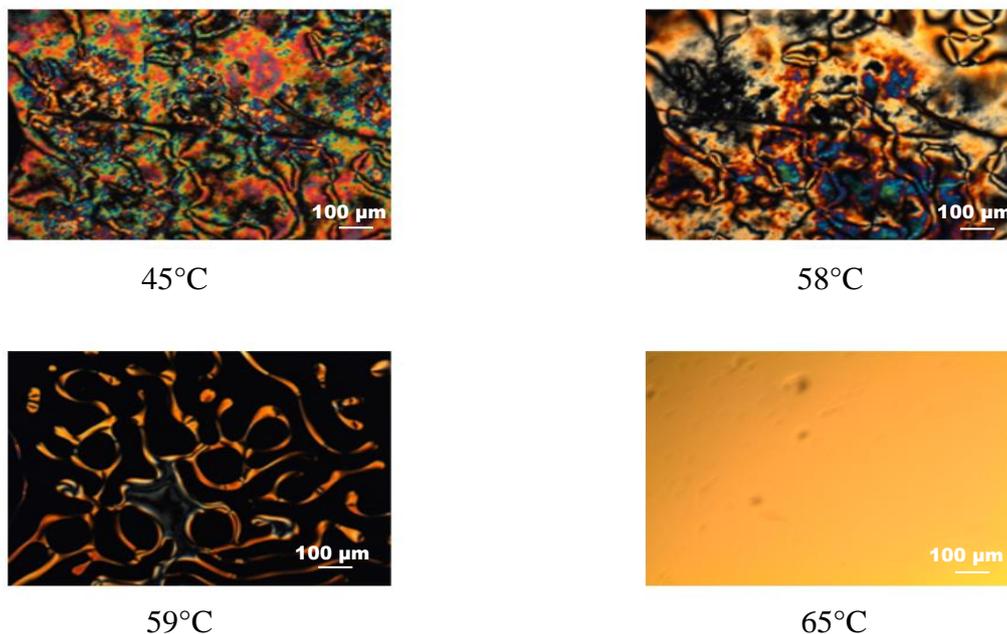


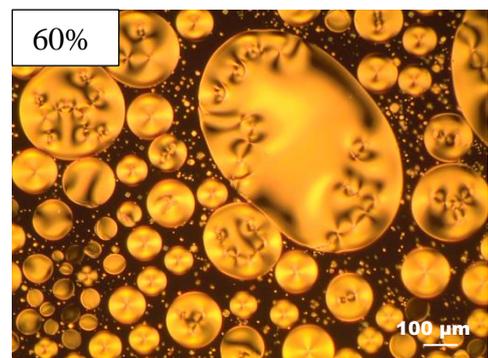
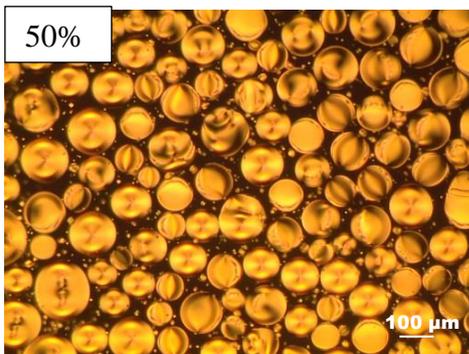
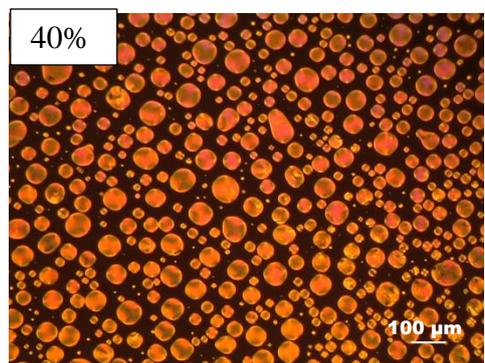
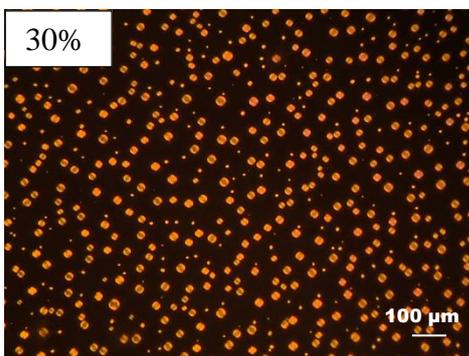
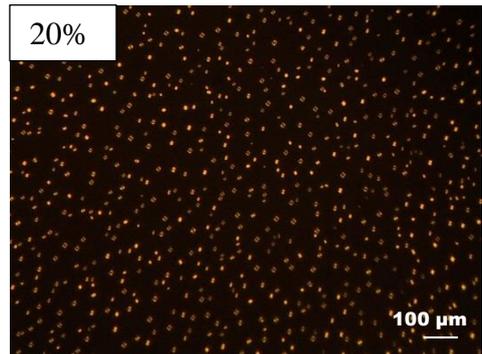
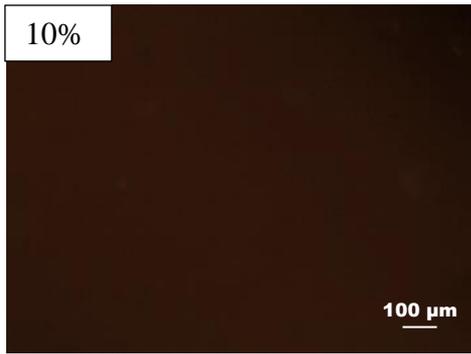
Figure III. 7:Photos MOP du cristal liquide E7 pur [14].

La similarité morphologique peut indiquer des similitudes structurelles entre les deux matériaux.

#### 4.1.2 Variation de la morphologie en fonction de la composition

Les mélanges p-2EHA/CLR préparés selon la méthode TIPS ont été analysés à l'aide de la microscopie optique polarisée (MOP). Les images présentées dans la figure III.8 ont été prises pendant une augmentation de la température de 0,5°C/min à partir de 25°C, où tous les domaines de cristal liquide (CL) étaient à l'état nématique. Ces images ont été obtenues en utilisant le mode de polarisation croisée (P/A) pour des mélanges présentant différentes concentrations de CLR. Nous avons observé que la taille des gouttelettes était petite pour les mélanges à faible concentration en CLR, puis augmentait jusqu'à la coalescence des gouttelettes pour le mélange contenant 90% de CLR. Les dimensions des gouttelettes étaient de l'ordre du micromètre. La partie noire correspond au polymère.

25°C



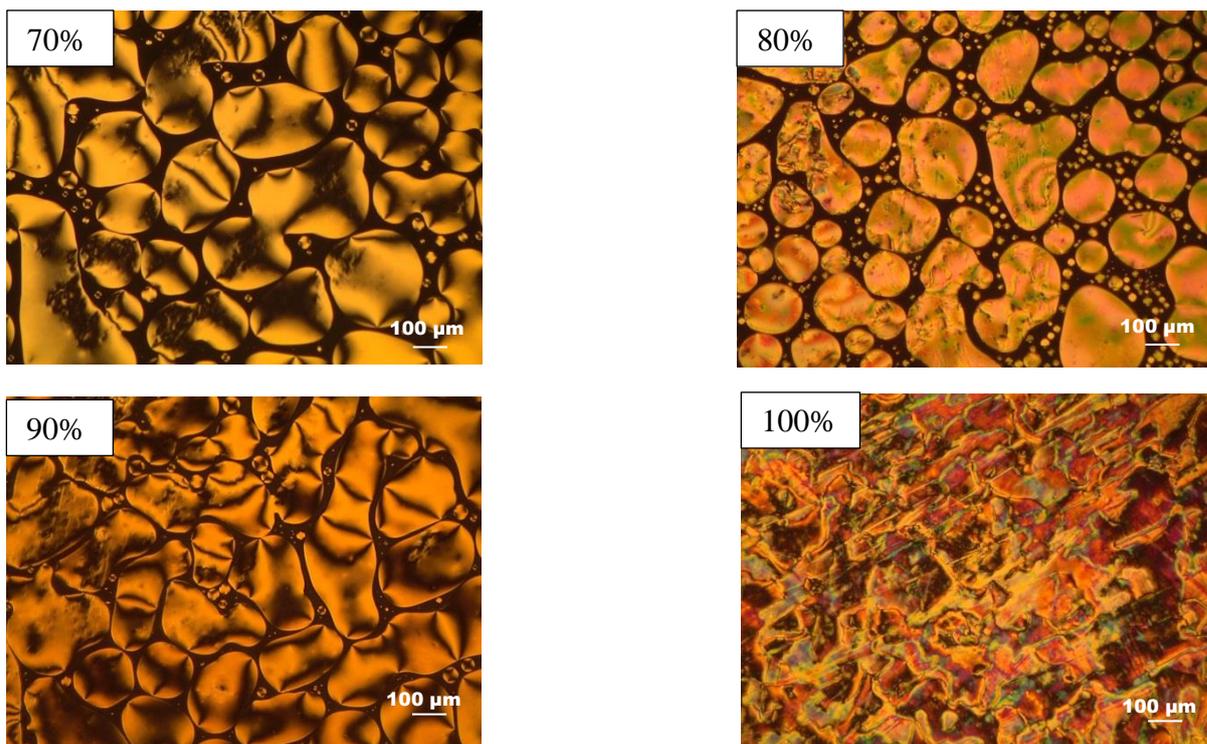
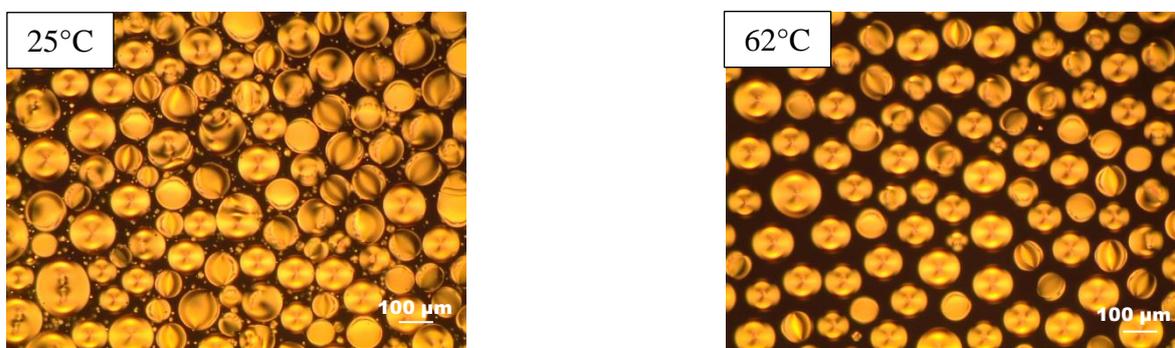
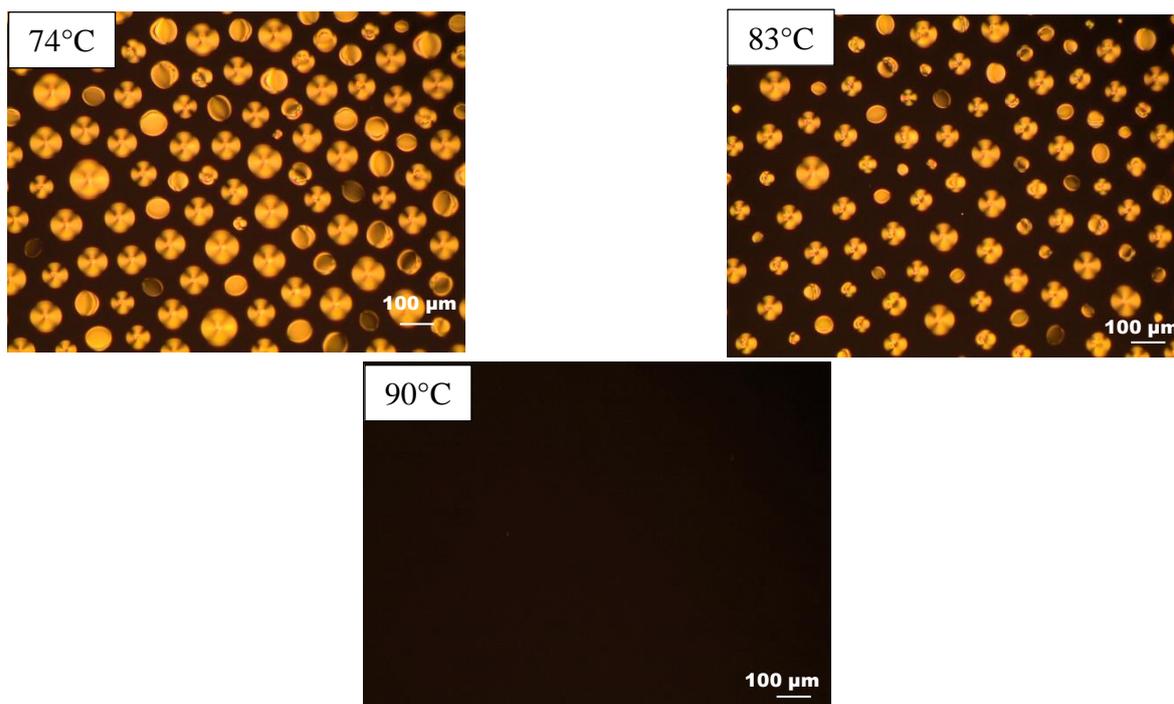


Figure III. 8: Texture des échantillons de p-2EHA/CLR à différentes concentrations observées à 25°C : Etat nématique-isotrope (10X).

#### 4.1.3 Variation de la morphologie en fonction de la température

Dans cette partie, nous avons examiné l'effet de la température sur la morphologie des systèmes p-2EHA/CLR, ainsi que sur la taille et le nombre de gouttelettes de CLR dans le mélange. La figure III.9 présente les textures du mélange p-2EHA/CLR (50/50) à différentes températures lors du chauffage avec une vitesse de 0,5°C/min. Nous avons observé que la taille des gouttelettes de CL à 25°C diminuait progressivement à mesure que la température augmentait, ce phénomène pouvant être expliqué par la transition de l'état nématique à l'état isotrope.





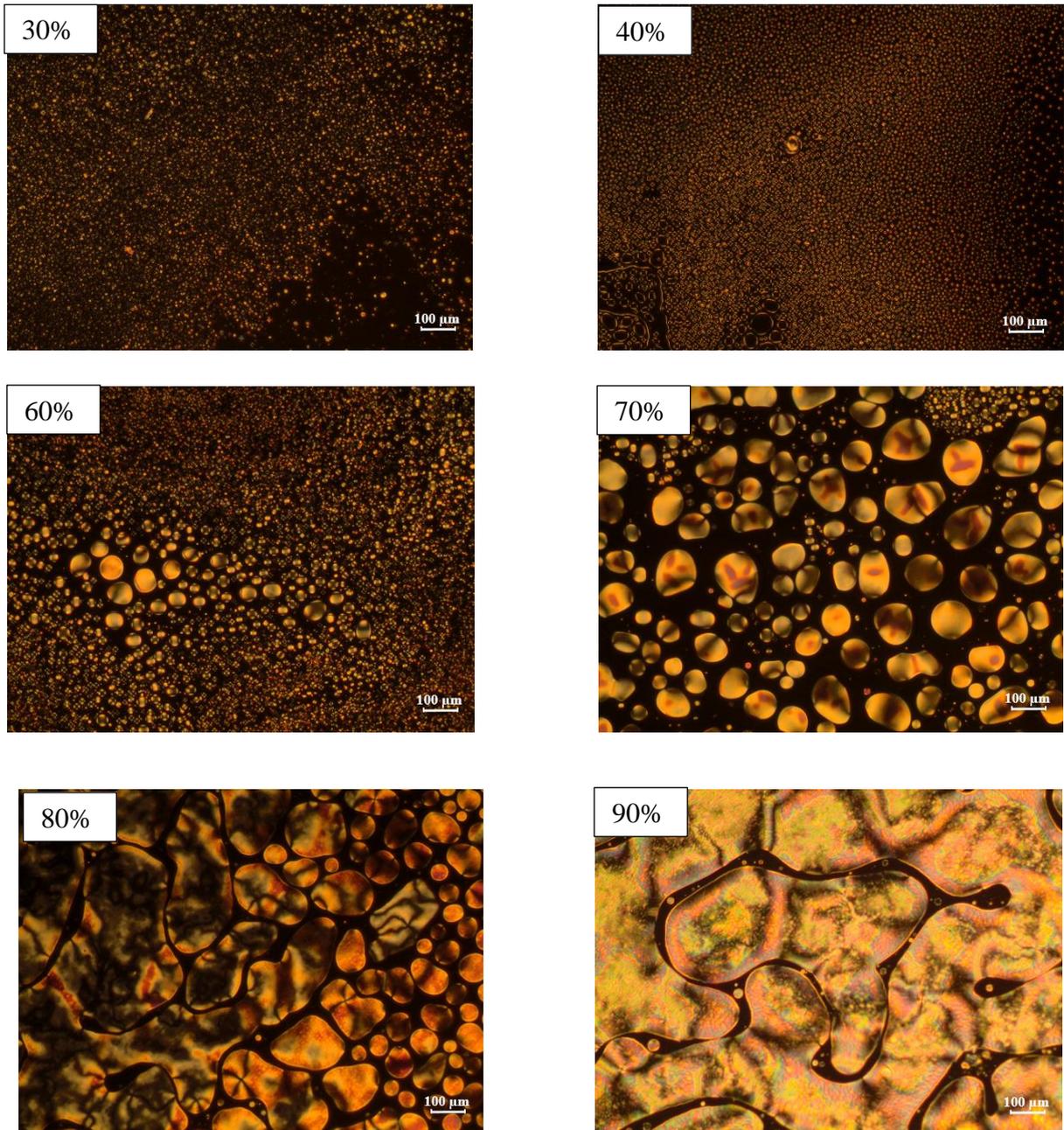
**Figure III. 9:** Morphologie des échantillons observés par MOP, pour le système p-2EHA/CLR (50/50) à plusieurs températures (grossissement 10X).

#### 4.1.4 Comparaison entre les systèmes p-2EHA/E7 et p-2EHA/CLR

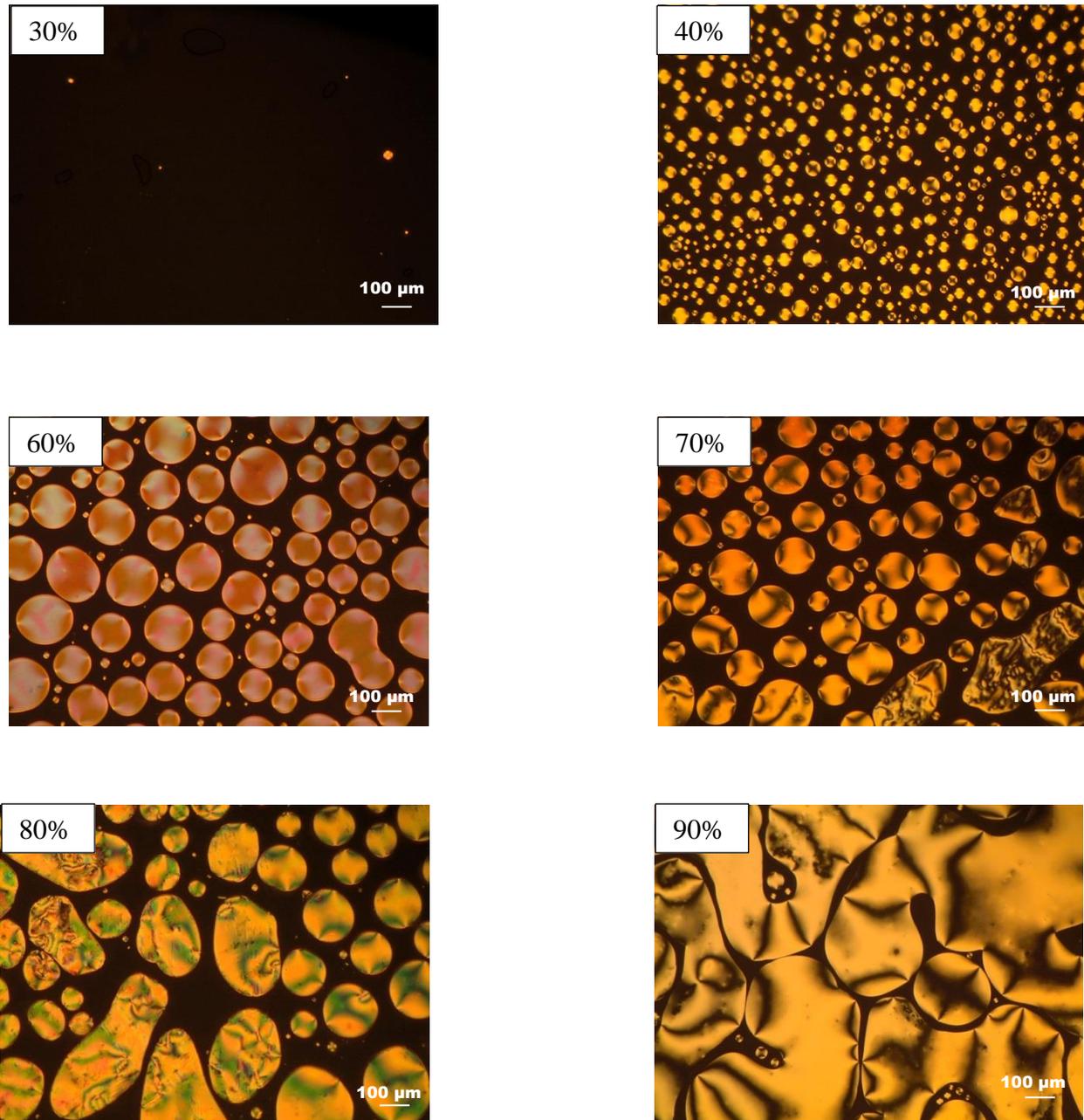
L'observation de la texture des cristaux liquides dans les mélanges de p-2EHA/E7 au MOP peut être réalisée lors d'une variation de température, que ce soit en augmentant ou en diminuant la température. La figure III.10 présente les différentes textures des mélanges à différentes concentrations en E7, enregistrées pendant une augmentation de température de 0,5°C/min à partir de 58°C (état nématique isotrope), avec une polarisation croisée. Les gouttelettes de cristal liquide E7 sont très petites dans les mélanges contenant de faibles proportions d'E7. Le nombre de gouttelettes diminue tandis que leur taille augmente dans les mélanges riches en E7, en raison de la coalescence des gouttelettes, qui devient évidente à partir de 80% d'E7. Dans les mélanges contenant 90% d'E7, la coalescence est totale [45].

La figure III.11 illustre les photos des mélanges à des différentes concentrations en CLR à 58°C (état nématique-isotrope) avec le P/A croisé. Nous distinguons une nette différence de la dimension des inclusions en fonction de la concentration du CLR. Plus la concentration de cristal liquide augmente plus la taille des gouttelettes augmente et ces derniers sont moins nombreux.

Les tailles des gouttelettes de cristal liquide E7 sont plus petite par rapport à celles des gouttelettes du cristal liquide CLR dans les mélanges en considérant la même composition à la même température.



**Figure III. 10:** Texture des échantillons de p-2EHA/E7 à différentes concentrations observées à 58°C : Etat nématique-isotrope (10X)[14].



**Figure III. 11:** Texture des échantillons de p-2EHA/CLR à différentes concentrations observées à 58°C : Etat nématique-isotrope (10X).

## 4.2 Diagramme de phases par MOP

### 4.2.1 Diagrammes de phases du système p-2EHA/CLR

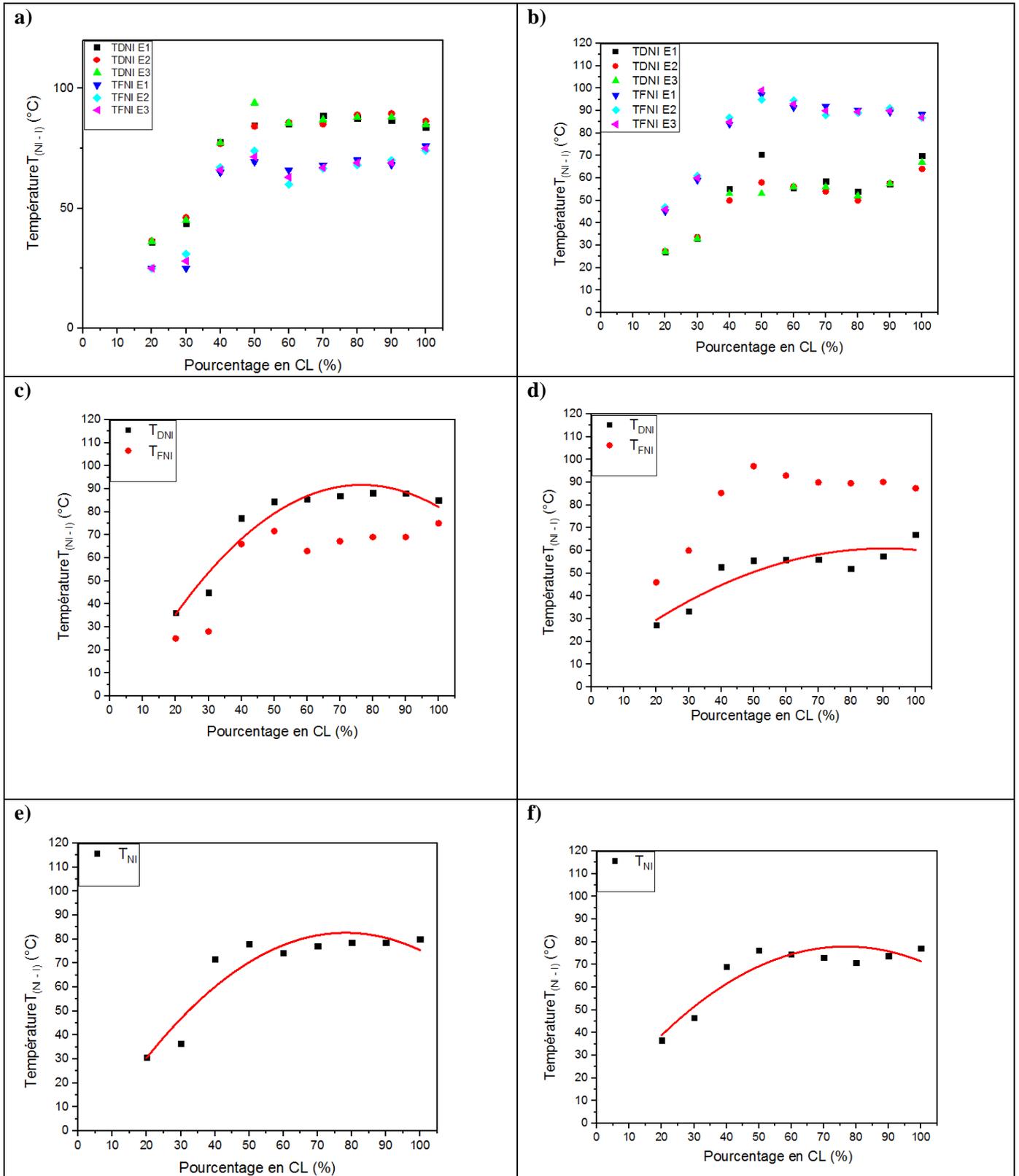
Le diagramme de phases a été élaboré en examinant la morphologie par microscopie optique polarisée (MOP) tout en modifiant la concentration de CLR dans le mélange initial, couvrant une plage allant de 10% à 100% de cristal liquide. Grâce à l'identification des

différentes structures et des transitions observées dans les domaines cristal liquide, nous avons pu construire le diagramme de phases.

La biréfringence et l'orientation du directeur nématique des gouttelettes de cristal liquide varient en fonction de l'orientation croisée ou parallèle du polariseur et de l'analyseur. Lorsqu'ils sont croisés, les clichés sont pris dans la région nématique-isotrope, tandis que lorsqu'ils sont parallèles, les clichés sont pris dans la région isotrope-isotrope. Dans notre cas nous utilisons l'orientation (P/A) croisés due à l'absence de transition isotrope-isotrope.

La température de transition (nématique + isotrope) vers (isotrope) (I) est une transition du premier ordre : un saut de paramètre d'ordre à la transition [48]. La figure III.12 illustre l'évolution de cette température de transition de l'état nématique isotrope à l'état isotrope pour le système p-2EHA/CLR. Les points représentés sont obtenus pour une rampe de chauffage et une autre de refroidissement de trois échantillons à différents % en CLR pour garantir la fiabilité des résultats.

Nous remarquons que la  $T_{NI}$  reste constante pour tous les mélanges à différentes concentrations en CLR mise à part les mélanges à faibles concentrations en CLR qui présentent une baisse de leur  $T_{NI}$  à partir de 40% en CLR. Nous observons également une légère différence entre les  $T_{NI}$  de chauffage et de refroidissement pour tous les mélanges étudiés. Cela peut être attribué au fait que la matrice est un polymère linéaire dans lequel les gouttelettes de cristal liquide sont dispersées de manière aléatoire entre les chaînes polymériques et à la surface.



**Figure III. 12:** Evolution de la transition (N-I) du mélange p-2EHA/CLR déterminée lors de refroidissement et de chauffage : a) tous les points début et fin de  $T_{NI}$  refroidissement, b) tous les points début et fin de  $T_{NI}$  chauffage, c) moyenne de début et fin de  $T_{NI}$  refroidissement, d) moyenne de début et fin de  $T_{NI}$  chauffage, e)  $T_{NI}$  refroidissement, f)  $T_{NI}$  chauffage.

### 4.2.2 Diagrammes de phases finaux

La figure III.13 montre le diagramme de phases donnant la température en fonction de la composition pour le système p-2-EHA/CLR, il montre deux régions distinctes (N+I) et (I). Dans le domaine (N+I) le mélange est hétérogène. Dans cette phase, il y a deux phases en équilibre : une phase riche en polymère dans laquelle le cristal liquide est dissous, coexistant avec une phase nématique en CL qui peut contenir du p-2-EHA. L'autre phase correspond à la phase I dans le laquelle le système présente une phase isotrope homogène (I).

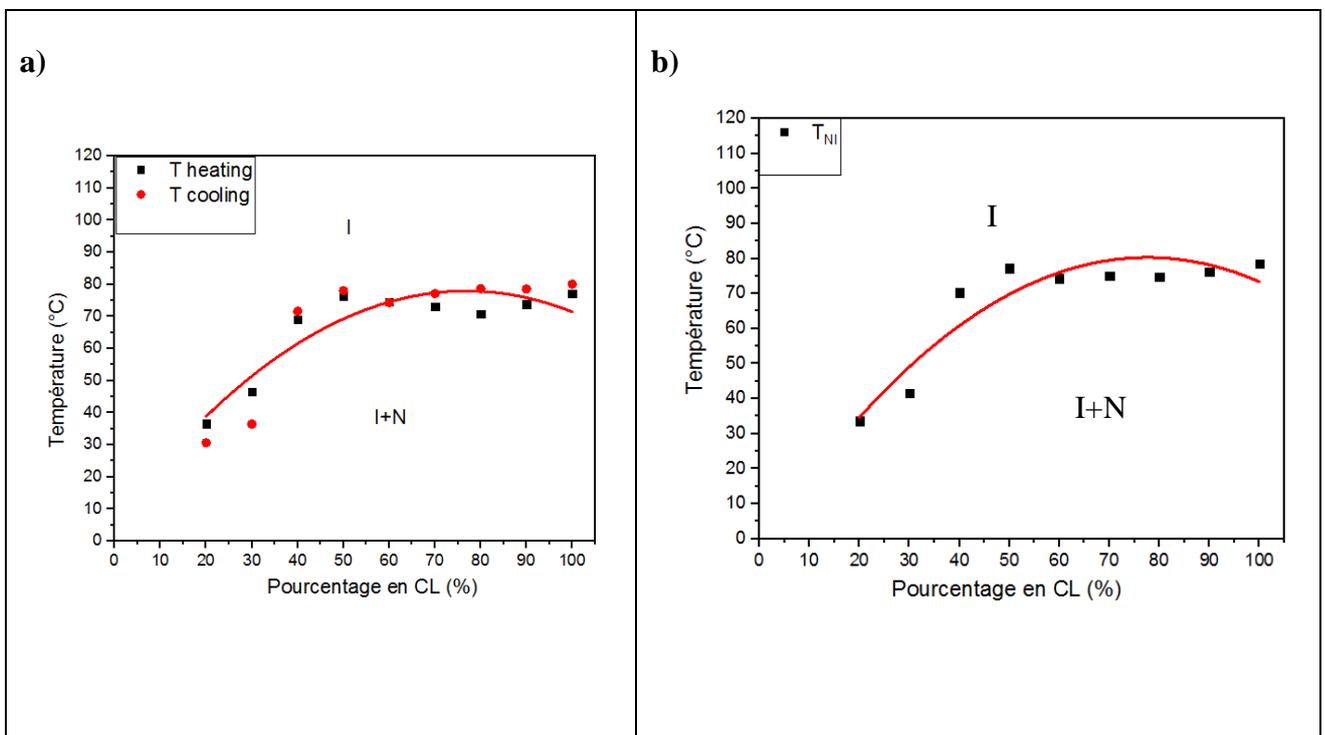
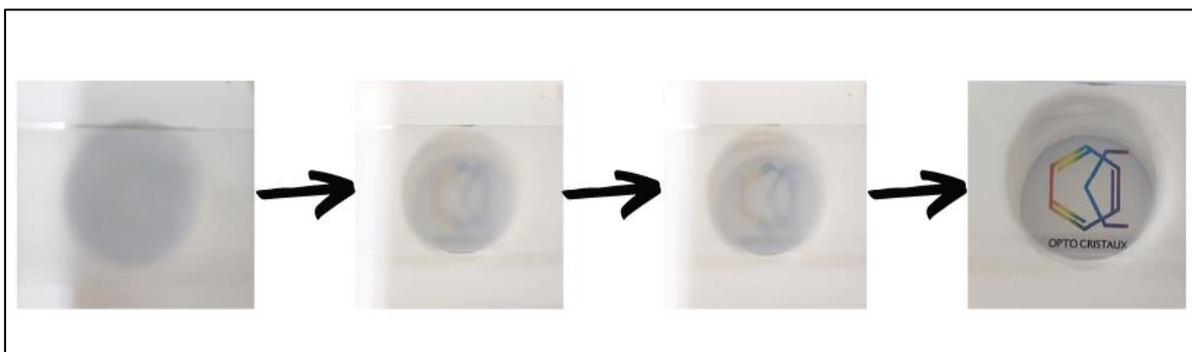


Figure III. 13: a) Diagramme de phases du p-2EHA/CLR refroidissement + chauffage, b) Diagramme de phases final du p-2EHA/CLR.

### Chauffage du film PDLC

Il est intéressant d'observer que le film PDLC à base de CLR et de la nouvelle matrice constituée de TPGDA présente une variation de clarté avec la température. Le film est opaque à une température ambiante mais devient progressivement plus transparent lorsqu'il est chauffé.

Ce comportement optique est représenté sur la figure III.14.

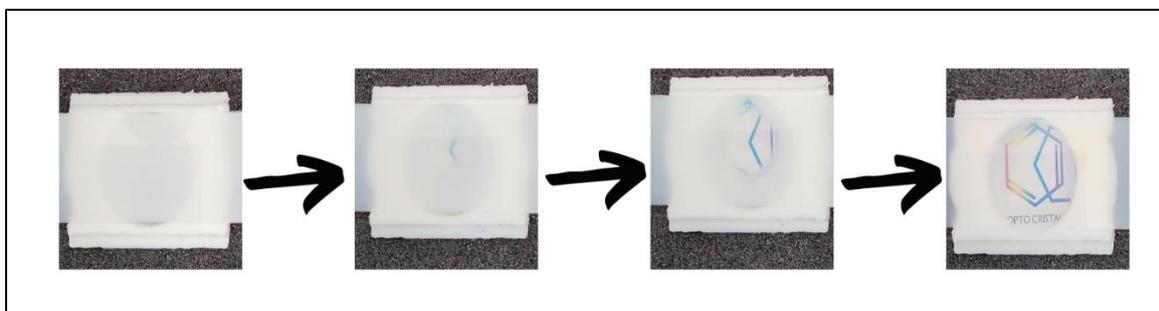


**Figure III. 14:** Effet de la température sur le film PDLC à base de 70% CLR

Un autre film PDLC a été élaboré mais cette fois-là à base de E7 et en gardant la même matrice qui est le TPGDA, à titre de comparaison avec le film à base de CLR.

La figure III.15 montre un film opaque qui en le chauffant, passe de l'état opaque à l'état transparents. Néanmoins le PDLC à base de E7 a une meilleure opacité que le film à base de CLR (figure III.16).

Cette différence d'opacité peut être attribuée aux propriétés intrinsèques du CLR et E7, ainsi qu'à leurs interactions avec la matrice de TPGDA.



**Figure III. 15:** Effet de la température sur le film PDLC à base de 70% E7

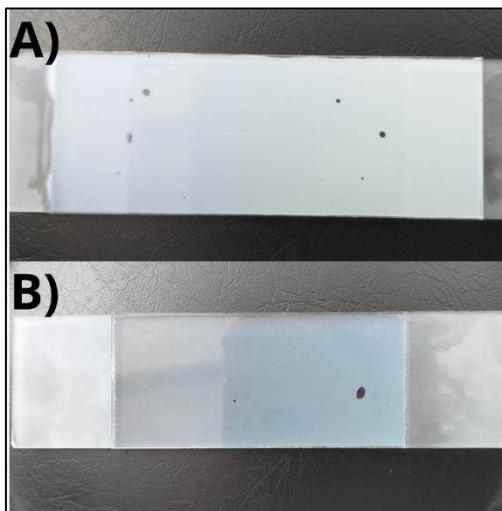


Figure III. 16: Différence d'opacité entre les films à base : A) 70% E7 et B) 70% CLR

## CONCLUSION

Dans ce chapitre final, nous avons étudié les films PDLC du système p-2-EHA / CLR en utilisant différentes techniques de caractérisation. Nous avons d'abord effectué une analyse spectroscopique infrarouge (FTIR) afin d'observer les bandes caractéristiques de nos matériaux et de les suivre à différentes concentrations de CLR. Dans une seconde partie, nous avons mesuré la température de transition nématique-isotrope  $T_{NI}$  des différents mélanges à l'aide de la calorimétrie différentielle à balayage (DSC). Ensuite, nous avons examiné leurs morphologies à l'aide d'un microscope optique à lumière polarisée (MOP) et établi leurs diagrammes de phases. Enfin, nous avons montré Le passage de l'état opaque à transparent des films PDLC après application d'une source de chaleur.

# **CONCLUSION GENERALE**

L'objectif principal de cette étude est l'élaboration de mélanges contenant des cristaux liquides dispersés dans une matrice polymère (PDLC) suivant la méthode de préparation TIPS, à base de Poly 2-ethylhexyl acrylate (p-2-EHA) et de cristal liquide obtenu du recyclage industriel des écrans LCD.

Les monomères choisis avec soin ont été sélectionnés pour leurs propriétés spécifiques, afin de créer un matériau qui présente des caractéristiques électro-optiques exceptionnelles. Ce matériau peut être utilisé dans diverses applications technologiques et industrielles. La préparation de ce polymère à cristaux liquides dispersés présente une avancée majeure dans le domaine des matériaux intelligents, ouvrant de nouvelles opportunités pour le développement de dispositifs innovants et de systèmes adaptatifs capables de répondre aux besoins changeants.

Dans le premier chapitre, une étude bibliographique approfondie a été faite fournissant ainsi un aperçu général sur les cristaux liquides et les polymères. La fabrication de composite PDLC et leurs applications ont également été abordés.

Le deuxième chapitre est consacré à la description détaillée de l'élaboration des mélanges PDLC et des films PDLC et à la compréhension du mode de fonctionnement des techniques de caractérisation utilisées tout au long de cette étude. A savoir, la spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR), La calorimétrie différentielle à balayage (DSC) et la microscopie optique à lumière polarisée (MOP). En combinant ces différentes techniques, nous avons pu évaluer de manière approfondie les propriétés thermiques des PDLC élaborés dans le cadre de cette étude.

Le troisième chapitre de ce manuscrit est dédié à la présentation des résultats obtenus tout au long de cette étude. Cette section cruciale a mis en évidence les interprétations et les découvertes issues de nos expérimentations et analyses :

- L'analyse spectrale FTIR nous a permis d'identifier les bandes caractéristiques du p-2-EHA et du CLR et d'observer leur diminution lorsque le pourcentage de ladite substance dans le mélange diminue.
- L'analyse enthalpique différentielle DSC nous a permis de déterminer les transitions smectique-nématique et nématique-isotrope des différents systèmes PDLC étudiés.
- L'analyse morphologique MOP a été utilisée pour identifier la nature des phases cristal liquide et suivre leur température de transition nématique-isotrope dans les différents mélanges réalisés. L'effet de la température sur la morphologie des

## CONCLUSION GENERALE

systemes p-2EHA/CLR a été réalisé, puis comparé avec les systemes p-2EHA/E7. La dernière étape de l'analyse morphologique à l'aide du MOP a été l'élaboration des diagrammes de phase selon la variation de la concentration de CLR dans le mélange initial.

- Pour finir un chauffage de film PDLC a été réalisé, montrant le passage de l'état opaque à transparent.

Cette étude approfondie des propriétés et des comportements de systemes PDLC a permis de mieux comprendre leurs caractéristiques et d'ouvrir la voie à de nouvelles applications prometteuses dans divers domaines, notamment dans la fabrication de fenêtre intelligentes commutables.

1. Gogibus, N., et al., *Thermophysical and structural properties of polymer/liquid crystal systems using polysiloxanes*. Encyclopedia of Analytical Chemistry: Applications, Theory and Instrumentation, 2006: p. 1-18.
2. Park, S., H.-K. Kim, and J.W. Hong, *Investigation of the photopolymerization-induced phase separation process in polymer dispersed liquid crystal*. Polymer Testing, 2010. **29**(7): p. 886-893.
3. Wang, K., et al., *Effect of 1-ethynyl-4-(trifluoromethyl) benzene on polymer network liquid crystal*. Liquid Crystals, 2021. **48**(7): p. 945-954.
4. Liu, C.-K., et al., *High-contrast and scattering-type transfective liquid crystal displays based on polymer-network liquid crystals*. Polymers, 2020. **12**(4): p. 739.
5. Nastał, E., E. Żurańska, and M. Mucha, *Effect of curing progress on the electrooptical and switching properties of PDLC system*. Journal of applied polymer science, 1999. **71**(3): p. 455-463.
6. Li, X., et al., *Enhanced low-temperature electro-optical Kerr effect of stable cubic soft superstructure enabled by fluorinated polymer stabilization*. Scientific Reports, 2017. **7**(1): p. 10383.
7. Vaz, N.A., G.W. Smith, and G.P. Montgomery Jr. *Polymer-dispersed liquid crystal films formed by e-beam cure*. in *Liquid Crystal Displays and Applications*. 1990. SPIE.
8. Reinitzer, F., *Contributions to the knowledge of cholesterol*. Liquid Crystals, 1989. **5**(1): p. 7-18.
9. Robinson, C., J. Ward, and R. Beevers, *Liquid crystalline structure in polypeptide solutions. Part 2*. Discussions of the Faraday Society, 1958. **25**: p. 29-42.
10. Meyer, R.B., *Piezoelectric effects in liquid crystals*. Physical Review Letters, 1969. **22**(18): p. 918.
11. dos Santos, W.A., *Centro de Ciências Exatas Departamento de Física*, 2020, Universidade Estadual de Maringá.
12. Mucha, M., *Polymer as an important component of blends and composites with liquid crystals*. Progress in polymer science, 2003. **28**(5): p. 837-873.
13. Drzaic, P.S., *Liquid crystal dispersions*. 1995.
14. BOURICHE, A., *Étude électro-optique des films PDLC à base de matrice acrylique*. 2012.
15. Piard, J., et al., *Synthèse et étude d'un cristal liquide cholestérique: fabrication d'un thermomètre*. Le Bulletin de l'Union des Professeurs de Physique et de Chimie, 2016. **109**(984): p. 661-685.

16. Bayon, C., *Microlentilles et micro-miroirs en cristal liquide cholestérique*, 2015, Université Paul Sabatier-Toulouse III.
17. TLEMÇANI, S., *REPOSE DYNAMIQUE DES MELANGES POLYMERES/CRISTAUX LIQUIDES*. 2011.
18. Gharbi, M.A., et al., *Behavior of colloidal particles at a nematic liquid crystal interface*. *Soft Matter*, 2011. **7**(4): p. 1467-1471.
19. Binet, C., et al., *First approach to the use of liquid crystal elastomers for chemical sensors*. *Talanta*, 2006. **69**(3): p. 757-762.
20. Dušek, K. and M. Ilavský, *Responsive gels: volume transitions I*1993: Springer.
21. Boussoualem, Y., *Propriétés électro-optiques et diélectriques de cristaux liquides photo-ferroélectriques*, 2010, Lille 1.
22. Goodship, V., A. Stevels, and J. Huisman, *Waste electrical and electronic equipment (WEEE) handbook*2019: Woodhead Publishing.
23. Shittu, O.S., I.D. Williams, and P.J. Shaw, *Global E-waste management: Can WEEE make a difference? A review of e-waste trends, legislation, contemporary issues and future challenges*. *Waste Management*, 2021. **120**: p. 549-563.
24. Baldé, C., et al., *Global Transboundary E-Waste Flows Monitor—2022*. International Telecommunication Union: Bonn, Germany, 2022.
25. Forti, V., et al., *The Global E-waste Monitor 2020: Quantities, flows and the circular economy potential*. 2020.
26. Amato, A. and F. Beolchini, *End of life liquid crystal displays recycling: A patent review*. *Journal of environmental management*, 2018. **225**: p. 1-9.
27. Barrera, A., et al., *Temperature and frequency dependence on dielectric permittivity and electrical conductivity of recycled Liquid Crystals*. *Journal of Molecular Liquids*, 2023. **378**: p. 121572.
28. Maier, W. and A. Saupe, *Eine einfache molekular-statistische Theorie der nematischen kristallinflüssigen Phase. Teil II*. *Zeitschrift für Naturforschung A*, 1960. **15**(4): p. 287-292.
29. AILAS nee SEMDANI, F., *Elaboration et caractérisation des matériaux à base de polymères et des cristaux liquides. Modélisation des diagrammes de phases*.
30. Decker, C., *Polymérisation sous rayonnement UV*2000: Ed. Techniques Ingénieur.
31. Doane, J., *NA Va?, BW Wu and 3. Zumer: Appl. Phys. Lett*, 1986. **48**: p. 269.
32. Nicoletta, F., et al., *A method to produce reverse-mode polymer-dispersed liquid-crystal shutters*. *Applied physics letters*, 1999. **74**(26): p. 3945-3947.

33. Perju, E., E. Paslaru, and L. Marin, *Polymer-dispersed liquid crystal composites for bio-applications: thermotropic, surface and optical properties*. Liquid Crystals, 2015. **42**(3): p. 370-382.
34. Fuh, A. and O. Caporaletti, *Polymer dispersed nematic liquid crystal films: The density ratio and polymer's curing rate effects*. Journal of applied physics, 1989. **66**(11): p. 5278-5284.
35. Nomura, H., S. Suzuki, and Y. Atarashi, *Electrooptical properties of polymer films containing nematic liquid crystal microdroplets*. Japanese journal of applied physics, 1990. **29**(3R): p. 522.
36. Ahmad, F., et al., *The effect of UV intensities and curing time on polymer dispersed liquid crystal (PDLC) display: a detailed analysis study*. Electronic Materials Letters, 2016. **12**: p. 685-692.
37. Han, C., et al., *Fabrication of a controllable anti-peeping device with a laminated structure of microlouver and polymer dispersed liquid crystals film*. Liquid Crystals, 2019. **46**(15): p. 2235-2244.
38. Javadian, S., et al., *A new approach to study interaction parameters in cyanobiphenyl liquid crystal binary systems*. The Journal of Chemical Thermodynamics, 2015. **80**: p. 22-29.
39. Ding, X., et al., *A study of electro-optical properties of PDLC films prepared by dual UV and heat curing*. Liquid Crystals, 2008. **35**(5): p. 587-595.
40. Bedjaoui, L., et al., *Selective solubility of E7 components in poly (n-butylacrylate)*. Physics Procedia, 2009. **2**(3): p. 1475-1479.
41. Marinov, Y., et al., *Electro-optical response of polymer-dispersed liquid crystal single layers of large nematic droplets oriented by rubbed teflon nanolayers*. Journal of applied physics, 2013. **113**(6): p. 064301.
42. Benkhaled, L., et al., *Electro-optical and Morphological Properties of Ultraviolet- and Electron Beam-cured Monomer/liquid Crystal Mixtures*. Molecular Crystals and Liquid Crystals, 2004. **422**(1): p. 153-162.
43. Smith, G.W. and N.A. Vaz, *Methods for determination of solubility limits of polymer-dispersed liquid crystals*. Molecular Crystals and Liquid Crystals Science and Technology. Section A. Molecular Crystals and Liquid Crystals, 1993. **237**(1): p. 243-269.
44. Cooper, J., *Compositional Analysis of Merck E7 Liquid Crystal Intermediates Using UltraPerformance Convergence Chromatography (UPC 2) with PDA Detection*. Waters Application Note 720004814en, 2013: p. 1-7.
45. Farcas, F., et al., *Identification et dosage par spectrometrie infrarouge a transformee de Fourier des copolymeres SBS et EVA dans les liants bitumineux*. 2009.

## REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE

46. Chen, T.-J., et al., *Optimized electro-optical properties of polymer-stabilized vertical-aligned liquid crystal displays driven by an in-plane field*. *Displays*, 2015. **37**: p. 94-99.
47. Russell, G.M., et al., *Thermal characterization of polymer-dispersed liquid crystals by differential scanning calorimetry*. *Chemistry of materials*, 1995. **7**(11): p. 2185-2189.
48. Thoen, J., H. Marynissen, and W. Van Dael, *Temperature dependence of the enthalpy and the heat capacity of the liquid-crystal octylcyanobiphenyl (8CB)*. *Physical Review A*, 1982. **26**(5): p. 2886.

## Résumé :

Le présent mémoire se concentre sur l'élaboration et la caractérisation de mélanges contenant des cristaux liquides dispersés dans une matrice polymère (PDLC) suivant la méthode de préparation TIPS, à base de Poly 2-ethylhexyl acrylate (p-2-EHA) et de cristal liquide recyclé (CLR). Différentes compositions ont été préparées, puis caractérisées à l'aide de diverses méthodes d'analyse afin de déterminer les propriétés de ces matériaux. La spectroscopie FTIR, l'analyse enthalpique différentielle DSC ainsi que la microscopie optique à lumière polarisée (MOP) ont permis l'obtention d'informations sur la structure moléculaire, les propriétés optiques et les transitions thermiques. Les résultats recueillis permettent d'évaluer les variations de composition et leurs impacts sur les propriétés des systèmes PDLC.

Mots clés : cristaux liquides dispersés dans un polymère, CLR, MOP

## Abstract:

The present study focuses on the development and characterization of mixtures containing liquid crystals dispersed in a polymer matrix (PDLC) following the TIPS preparation method, based on Poly 2-ethylhexyl acrylate (p-2EHA) and recycled liquid crystal (CLR). Different compositions were prepared, then characterized by various analytical techniques in order to determine the properties of these materials. FTIR spectroscopy, differential enthalpy analysis DSC and polarized light optical microscopy (MOP) provided information on molecular structure, optical properties and thermal transitions. The results collected make it possible to evaluate the variations of composition and their impacts on the properties of the PDLC systems.

Key words: polymer-dispersed liquid crystal, CLR, MOP

## ملخص

تركز الدراسة الحالية على تطوير وتوصيف المخاليط المحتوية على بلورات سائلة مشتتة في مصفوفة بوليمر (PDLC) باتباع طريقة تحضير TIPS، بناءً على Poly 2-ethylhexyl acrylate (p-2EHA) والبلورات السائلة المعاد تدويرها (CLR). تم تحضير تراكيب مختلفة، ثم تميزت بتقنيات تحليلية مختلفة من أجل تحديد خصائص هذه المواد. قدم التحليل الطيفي FTIR وتحليل المحتوى الحراري التفاضلي DSC والفحص المجهر الضوئي للضوء المستقطب (MOP) معلومات عن التركيب الجزيئي والخصائص البصرية والانتقالات الحرارية. تتيح النتائج التي تم جمعها تقييم الاختلافات في التركيب وتأثيراتها على خصائص أنظمة PDLC.

الكلمات الأساسية: PDLC، CLR، MOP

# ANNEXE

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

# Business Model Canevas

Date de dépôt : Dimanche 25 juin 2023

Etudiant :

- NEMICHE Mohamed

Encadrante :

- BEDJAOUI-ALACHAHER Lamia

N° de projet : S\_37

Nom du projet : **OPTO- CRISTAUX**



OPTO CRISTAUX

Année universitaire : 2022/2023

## **1- Valeurs ajoutées:**



- Recyclage efficace et responsable des cristaux liquides provenant des écrans LCD : nous donnerons une seconde vie aux cristaux liquides qui étaient auparavant jetés, polluant ainsi notre environnement.
- Respect des réglementations environnementales et des normes de sécurité : le but de ce projet est de diminué la quantité de DEEE dans l'environnement en recyclant ces déchets et en utilisant des solvant verts moins toxique.
- Offre d'une solution complète pour le traitement des écrans LCD, y compris l'extraction et la purification des cristaux liquides : grâce à notre savoir-faire nous pourrons démanteler ces écrans et en tirer plusieurs bénéfices.
- Fabrication de fenêtres commutables : les cristaux liquides récupérés pourront être utilisé dans la fabrication de fenêtres intelligentes plus rentables.

## **2- Clients:**



- Fabricants d'écrans LCD qui cherchent à recycler leurs produits obsolètes : nous pouvons recycler les stocks d'écrans LCD qui se cumulent chez eux pour qu'ils puissent les réutiliser dans de nouveaux écrans.
- Centres de collecte de déchets électroniques et organismes gouvernementaux : avec qui nous pouvons être en collaboration pour le bien de l'environnement.
- Usines de recyclage de plastiques, métaux, verres : à qui nous pourrions vendre les plastiques, métaux et verres récupérés du recyclage des écrans LCD.
- l'industrie électronique : principaux utilisateurs de l'indium pouvant être récupérés des LCD ou le graphène qui est utilisé dans bien d'autres domaines.
- Au public : à qui nous pouvons vendre les fenêtres intelligentes fabriquées dans nos locaux.

### **3- Relations clients:**



- Établissement de relations durables avec les clients par le biais d'un excellent service client.
- Suivi régulier pour répondre à leurs besoins spécifiques en matière de recyclage des cristaux liquides.
- Proposer des fenêtres a prix compétitifs et plus écologique

### **4- Canaux**



- Ventes directes et marketing auprès des fabricants d'écrans LCD : nous pouvant vendre directement aux fabricants comme on peut aussi être en collaboration avec eux.
- Partenariats avec des entreprises de recyclage électronique et des centres de collecte de déchets électroniques : ils s'occuperont de la collecte et du transport et nous nous occuperons du recyclage
- Participation à des salons professionnels et événements de l'industrie : quoi de mieux pour se faire connaître du grand public que de montrer son savoir-faire et son professionnalisme dans ces événements.
- Créer notre propre salle d'exposition où nous pourrions vendre nos fenêtres et montrer qu'elles sont faites à partir du recyclage

## **5- Partenaires** **clé:**



- Fournisseurs de matériels électroniques usagés pour l'approvisionnement en écrans LCD à recycler.
- Entreprises de recyclage électronique pour des partenariats de collaboration
- Sociétés spécialisées dans l'élimination des déchets dangereux.
- Laboratoires de produits chimiques pour l'approvisionnement en solvants et autres produits chimique
- Fournisseurs d'appareils pour faire nos analyses et purifier nos cristaux liquides récupérés

## **6- Activités :**



- Collecte des écrans LCD usagés auprès des fabricants, des entreprises de recyclage électronique et des centres de collecte de déchets électroniques.
- Démontage et extraction des cristaux liquides des écrans LCD.
- Purification des cristaux liquides et élimination sûre des déchets générés.
- Fabrication de fenêtre intelligente à partir des cristaux liquides recyclés

## **7- Ressources :**



- Équipements de recyclage spécialisés, tels que des machines de désassemblage et des systèmes de purification.
- Personnels qualifiés et formés dans le recyclage des écrans LCD et la manipulation des solvants.
- Installations de stockage et de traitement adaptées aux exigences du recyclage des cristaux liquides.
- Mise a disponibilité des solvants utilisés dans notre travail

## **8- Coût :**



Les différents coûts sont répertoriés dans les tableaux suivants :

### **Tableau des coûts généraux :**

<b>Nom</b>	<b>Prix (DA)</b>
Local (350 m2) par an	1200000.00
Installation d'électricité	100000.00
Installation d'eau	100000.00
Système de ventilation	150000.00
<b>Total</b>	<b>1550000.00</b>

### **Fournitures de bureaux :**

Nom	Prix (DA)
3 Bureaux	30000.00
8 Tables	15000.00
36 Chaises	3000.00
10 Tabourets	3000.00
Banc	15000.00
4 Ordinateurs	100000.00
3 Imprimantes	50000.00
3 Caméras de sécurité	5000.00
3 Extincteurs	5000.00
3 Climatiseurs	120000.00
5 Bennes à ordures	15000.00
Fournitures de bureau	20000.00
<b>Total</b>	<b>1668000.00</b>

**Equipement du laboratoire :**

Nom	Prix (DA)
Solvant	10000000.00
Etuve	150000.00
Centrifugeuse	400000.00
Verrerie	250000.00
Appareil de mesure	150000.00
Hotte	150000.00
Réfrigérateur	60000.00
3 citernes	30000.00
10 tagères	15000.00
Bacs à solvant en fibre model rotatif équipé	600000.00
2 paillasses	100000.00
<b>Total</b>	<b>12200000.00</b>

**Salaires employés :**

<b>Profil</b>	<b>Salaire (DA)</b>	<b>Total (DA)</b>
Directeur	60000.00	720000
2 Chimistes	30000.00	360000
Chef d'équipe	45000.00	540000
2 Techniciens	30000.00	360000
3 Ouvriers	25000.00	300000
Délégué commerciale	30000.00	360000
Femme de ménage	20000.00	240000
Agent de sécurité de nuit	20000.00	240000
<b>Total</b>	<b>370000.00</b>	<b>4440000</b>

**Charges annuelle :**

<b>Charges par an</b>	<b>Prix (DA)</b>
Consommation (eau, électricité, internet, téléphone)	420000.00
Investissement marketing	300000.00
Frais d'assurance	Variable
Frais de déplacement	Variable
<b>Total</b>	<b>720000.00</b>

**Coût total :**

<b>Charges</b>	<b>valeur (DA)</b>
<b>Coût généraux</b>	<b>1550000.00</b>
<b>Salaires employés</b>	<b>4440000</b>
<b>Charges annuelles</b>	<b>720000.00</b>
<b>Equipement du laboratoire</b>	<b>12200000.00</b>
<b>Fournitures de bureaux</b>	<b>1660000.00</b>
<b>Total</b>	<b>20570000.00</b>

**9- Revenue streams:****9- مصادر الإيرادات:**

Matériaux récuperer	Quantité	Prix a l'unité	Revenu par trimeste	Revenue annuel
Indium	1	32000	32000	128000
Verre	300	5000	1500000	6000000
Carte é	200	variable	variable	variable
CL	4	1500	6000	24000
Plastique	300	100	30000	120000
Métaux	500	1000	500000	2000000
Métaux non féreux	100	450	45000	180000
Total			2113000	8452000

Ajoutons à cela la vente des fenêtres intelligentes fabriqué a base de cristaux liquides recyclés valant 150000DA/m

## Business Model Canvas

### Partenaires clés

- Fournisseurs de matériels électroniques usagés
- Laboratoires de produits chimiques
- Fournisseurs d'appareils de purification
- Entreprises de recyclage électronique

### Activités clés

- Collecte des écrans LCD usages
- Recyclage des écrans LCD
- Fabrication de fenêtre intelligente

### Ressources clés

- Equipements de recyclage spécialisé
- Mise à disponibilité des solvants
- Personnels qualifiés

### Proposition de valeur

- Recyclage des cristaux liquides des écrans LCD
- Fabrication de fenêtres intelligentes
- Respect de l'environnement
- marché vierge

### Relation clients

- Etablir des relations durables
- Suivie régulier

### Canaux

- Marketing auprès des fabricants d'écrans LCD
- Salons professionnels
- Partenariats avec des entreprises
- Salle d'exposition

### Segment client

- Fabricants d'écrans LCD
- Usines de recyclage de plastique, métaux et verre
- L'industrie électronique
- Au public

### Coûts

- Coût généraux : **1550000.00**  
Salaires employés : 4440000  
Charges annuelles : 720000  
Equipement du laboratoire : 12200000  
Fournitures de bureaux : 1660000  
Total : **20570000.00**

### Revenus

Indium : 128000	Verre : 6000000
Cartes électroniques : variable	CL : 24000
Plastique : 120000	Métaux : 2000000
Métaux N F : 180000	Fenêtre intelligente : 150000/m <sup>2</sup>

