

Patrick Oswald
Pawel Pieranski

LES CRISTAUX LIQUIDES

Concepts et propriétés physiques
illustrés par des expériences

TOME 1



GIB

Gordon and Breach
Science Publishers

TABLE DES MATIÈRES

Tome 1

Préface de Jacques FRIEDEL	XV
Préface des auteurs	3
PARTIE A GÉNÉRALITÉS	5
Chapitre A.I Un peu d'Histoire	7
I1 Georges Friedel et les cristaux liquides.	7
I2 La découverte des substances biologiques biréfringentes mais fluides par Buffon, Virchow et Mettenheimer; les cristaux liquides lyotropes	9
I3 Observation du surprenant comportement des esters du cholestérol par Planer et Reinitzer : les cristaux liquides thermotropes	13
I4 « Flüssige Kristalle » ou les « cristaux qui coulent » d'Otto Lehmann.	14
Chapitre A.II La classification moderne des cristaux liquides	17
II.1 Mise en ordre terminologique par Georges Friedel	17
II.1.a) Polymorphisme et états mésomorphes	17
II.1.b) Phases nématiques et cholestériques	18
II.1.c) Phases smectiques	19
II.2 Définition moderne des mésophases; symétries brisées; ordre à courte et à grande distance	21
II.3 Classification des phases smectiques	25
II.4 Classification des phases colonnaires	30
II.5 Phases smectiques chirales	31
Chapitre A.III Anatomie mésogène	35
III.1 Les cristaux liquides thermotropes	36
III.1.a) Forme moléculaire hybride et frustration moléculaire	36
III.1.b) Rôle des petits détails structuraux	39

III.1.c) Mélanges eutectiques	40
III.1.d) Ancêtres et parents des cyanobiphényles	42
III.1.e) Architecture générale des molécules smectogènes ou nématogènes : les molécules calamitiques	45
III.1.f) Autres exemples de molécules mésomorphes : les molécules discoïdes	46
III.2 Les cristaux liquides lyotropes	50
III.3 Les cristaux liquides de copolymères diblocs	58
III.4 Les cristaux liquides colloïdaux	59
PARTIE B MÉSOPHASES À L'ORDRE D'ORIENTATION	63
Chapitre B.I Structure et propriétés diélectriques de la phase nématique ...	65
I.1 Paramètre d'ordre quadrupolaire	66
I.1.a) Nématique uniaxe	66
I.1.b) Nématique biaxe	70
I.2 Transition de phase nématique uniaxe-liquide isotrope	71
I.2.a) Théorie de Landau-de Gennes	71
I.2.b) Mesure des coefficients de Landau : effet Cotton-Mouton et effet Kerr	73
I.3 Transition de phase nématique uniaxe-nématique biaxe	77
I.4 Propriétés diélectriques à basse fréquence	80
I.4.a) Énergie potentielle d'une molécule dans un champ électrique	80
I.4.b) Dipôles permanent et induit d'une molécule isolée : rôle de la symétrie moléculaire	81
I.4.c) Absence de polarisation spontanée et flexo-électricité de la phase nématique	82
I.4.d) Anisotropie diélectrique	87
I.5 Propriétés optiques	92
I.5.a) Expérience préliminaire : double réfraction sur un prisme nématique	92
I.5.b) Rayons ordinaire et extraordinaire : modes propres	92
I.5.c) Calcul de la trajectoire du rayon extraordinaire : généralisation du principe de Fermat (Grandjean 1919)	97
I.5.d) Modes propres d'un nématique torsadé	102
Chapitre B.II Nématoélasticité : transition de Frederiks et diffusion de lumière	107
II.1 Expérience de Grupp	108
II.2 Énergie libre de Frank-Oseen	110
II.3 Minimisation de l'énergie libre : champ moléculaire et couples élastiques	116

TABLE DES MATIÈRES

II.4	Interprétation de l'expérience de Grupp	118
II.5	Action d'un champ magnétique.....	120
II.5.a)	Interprétation physique du couple en volume	120
II.5.b)	Champ moléculaire magnétique.....	121
II.5.c)	Longueur de cohérence magnétique.....	122
II.5.d)	Instabilité de Frederiks en champ magnétique.....	124
II.5.e)	Application à la mesure des constantes élastiques.....	127
II.6	Action d'un champ électrique : affichage.....	130
II.6.a)	Mise en application d'un champ électrique	130
II.6.b)	Réalisation d'un afficheur à 16 pixels.....	133
II.7	Diffusion élastique de la lumière et mesure des constantes de Frank	137
II.8	Optique non linéaire	143
II.8.a)	Transition de Frederiks induite par une onde lumineuse.....	143
II.8.b)	Analyse non linéaire	148
II.8.c)	Autofocalisation d'un faisceau laser	152
	ANNEXE 1 Calcul de la section efficace différentielle de diffusion	156
	ANNEXE 2 Expression de l'énergie libre dans l'espace de Fourier	158
Chapitre B.III	Nématodynamique et instabilités d'écoulement	159
III.1	Observations préliminaires montrant quelques différences fondamentales entre un nématique et un liquide ordinaire	160
III.1.a)	Instabilité de Frederiks et viscosité rotationnelle	160
III.1.b)	Scintillement et fluctuations d'orientation du directeur	163
III.1.c)	Expérience de Wahl et Fischer : rôle du cisaillement sur l'orientation du directeur	164
III.1.d)	Effet de « back-flow »	166
III.1.e)	Viscosités sous cisaillement : expériences de Miesowicz et de Gähwiler ..	166
III.2	Équations de la nématodynamique linéaire.....	168
III.2.a)	Choix des variables hydrodynamiques	168
III.2.b)	Torseur des forces surfaciques	169
III.2.c)	Équations de conservation de la masse et de la quantité de mouvement ..	170
III.2.d)	Construction du tenseur des contraintes	171
III.2.e)	Équation d'équilibre des couples : application du théorème du moment cinétique	174
III.2.f)	Production irréversible d'entropie	177
III.2.g)	Résumé des équations et description des modes hydrodynamiques	179
III.3	Écoulements laminaires de Couette et de Poiseuille.....	182
III.3.a)	Cisaillement simple sous fort champ magnétique (Couette) et calcul des viscosités de Miesowicz	182

III.3.b) Écoulement de Poiseuille et contrainte visqueuse « transverse »	185
III.4 Stabilité des écoulements laminaires	187
III.4.a) Nombres de Reynolds et d'Ericksen	187
III.4.b) Stabilité sous cisaillement : calcul du couple hydrodynamique	188
III.4.c) Déstabilisation sous cisaillement lorsque $n // \text{grad } v$ et $n \perp v$	191
III.5 Instabilités convectives d'origine electro-hydrodynamiques	195
III.5.a) Modèle théorique	195
III.5.b) Régime non linéaire	202
III.6 Instabilités thermiques	204
III.6.a) Analyse qualitative, rôle de l'anisotropie de la conductivité thermique	204
III.6.b) Anisotropie de la conductivité thermique	205
III.6.c) Focalisation de la chaleur	206
III.6.d) Calcul du seuil d'instabilité en géométrie planaire	208
III.6.e) Instabilité en géométrie homéotrope	211
III.6.f) Mise en évidence expérimentale	213
III.6.g) Instabilités thermiques en présence d'un champ magnétique	215
ANNEXE 1 Théorème de « dérivation sous le signe somme »	220
ANNEXE 2 Identité rotationnelle	222
ANNEXE 3 Calcul de la production irréversible d'entropie	223
ANNEXE 4 Dissipation d'énergie et lois de comportement dans le formalisme de Leslie-Ericksen-Parodi	224
ANNEXE 5 L'instabilité de Rayleigh-Bénard dans les fluides isotropes	226
ANNEXE 6 Effet d'un cisaillement elliptique, mesure du coefficient α_3	230
Chapitre B.IV Défauts et textures dans les nématiques	233
IV.1 Observations au microscope polarisant	234
IV.2 Processus de Volterra, de Gennes, Friedel	239
V.2.a) Éléments de symétrie d'un nématique uniaxe	239
V.2.b) Construction d'une disinclinaison	239
IV.3 Énergie d'une ligne dièdre planaire en élasticité isotrope	243
IV.4 Modèle de cœur continu : énergie libre de Landau-Ginzburg-de Gennes	246
IV.5 Énergie d'interaction entre deux lignes dièdre parallèles	250
IV.6 Dynamique d'une ligne dièdre planaire : calcul de la force de friction	252
IV.7 Stabilité des lignes dièdre : échappement dans la troisième dimension	259
IV.7.a) Stabilité topologique	259
IV.7.b) Stabilité énergétique (milieu infini)	261
IV.7.c) Disinclinaisons en milieu confiné (tube capillaire)	265

TABLE DES MATIÈRES

IV.8 Paroi de Bloch et paroi d'Ising induites par l'instabilité de Frederiks	270
IV.8.a) Dispositif expérimental	270
IV.8.b) Prédictions théoriques	270
IV.8.c) Comparaison avec l'expérience	278
Chapitre B.V Ancrage et transitions d'ancrage des nématiques sur des surfaces solides	285
V.1 Les précurseurs	286
V.2 Sur la notion d'interface	287
V.3 Symétrie des interfaces et classification des différents types d'ancrage . . .	288
V.4 Mouillage et sélection de l'ancrage	293
V.5 Transitions d'ancrage	300
V.5.a) Transitions d'ancrage sur les films évaporés de SiO ₂	300
V.5.b) Transitions d'ancrage sur le mica muscovite	306
V.5.c) Transitions d'ancrage sur le gypse	312
V.6 Mesure de l'énergie d'ancrage dans le cas homéotrope	313
Chapitre B.VI Interface nématique-liquide isotrope : propriétés statiques et instabilités en croissance directionnelle	317
VI.1 Angle d'ancrage, tension de surface et épaisseur de l'interface nématique-isotrope	318
VI.2 Théorie de Landau-Ginzburg-de Gennes	325
VI.3 Instabilité en géométrie confinée	330
VI.4 Correction élastique à la relation de Gibbs-Thomson	334
VI.5 Croissance directionnelle du front nématique-liquide isotrope	340
VI.5.a) Mise en évidence de l'instabilité de Mullins et Sekerka	341
VI.5.b) Instabilités secondaires en régime de croissance rapide et restauration absolue	345
VI.5.c) Décrochage d'une ligne de disclinaison	350
Chapitre B.VII Cholestérique : le premier exemple de mésophase frustrée . .	357
VII.1 Frustration cholestérique	358
VII.2 Paramètre d'ordre cholestérique et transition cholestérique-liquide isotrope	362
VII.2.a) Structure et symétrie de la phase cholestérique	362
VII.2.b) Paramètre d'ordre de la phase cholestérique	364
VII.2.c) Théorie de Grebel, Hornreich et Shtrikman de la transition liquide isotrope-cholestérique	365
VII.3 Propriétés optiques d'un cholestérique	370

VII.4 Défauts et textures de la phase cholestérique	378
VII.4.a) « Coin de Grandjean-Cano »	379
VII.4.b) Disinclinaisons λ , τ et χ	385
VII.4.c) Ligne « double » dans un coin de Cano	386
VII.4.d) Plages à éventails et champs polygonaux	390
VII.5 Transition de déroulage	392
VII.5.a) Déroulage sous champ magnétique	393
VII.5.b) Transition de déroulage induite par une frustration géométrique : faits expérimentaux	396
VII.5.c) Représentation du TIC et des doigts cholestériques sur la sphère S ² : application à la transition de déroulage induite par confinement	400
VII.5.d) Modèle de Landau-Ginzburg dérivé uniquement des arguments de symétrie	406
VII.5.e) Action conjuguée de la frustration et d'un champ électrique	407
VII.5.f) Sphérulites	410
VII.5.g) Doigts de seconde et troisième espèce	412
VII.5.h) Dynamique des doigts de première et de seconde espèce : reptation et spirales cholestériques	414
VII.5.i) Cas des échantillons très épais devant le pas cholestérique : instabilité d'Helfrich-Hurault	417
VII.6 Hydrodynamique des cholestériques	418
VII.6.a) Perméation	418
VII.6.b) Rotation Lehmann	421
Chapitre B. VIII Phases Bleues :	
un deuxième exemple de mésophase frustrée	429
VIII.1 Mise en évidence de la symétrie cubique des Phases Bleues I et II	430
VIII.2 Modèle uniaxe des Phases Bleues : réseaux de disinclinaisons	431
VIII.3 Modèle biaxe des Phases Bleues de Grebel, Hornreich et Shtrikman	436
VIII.4 Théorie « à la Landau » des Phases Bleues de Grebel, Hornreich et Shtrikman	439
VIII.5 Expériences	445
VIII.5.a) Diagrammes de Kossel des Phases Bleues I et II	446
VIII.5.b) Facettage des Phases Bleues cubiques	449
VIII.5.c) Effet du champ électrique sur les Phases Bleues	453
- Orientation des cristaux par le champ	453
- Déformation des cristaux par le champ	457
- Phases Bleues tétragonale et hexagonales induites par le champ	457
VIII.5.d) Élasticité des Phases Bleues	459

Chapitre B.IX Rappels sur la croissance et l'instabilité de Mullins et Sekerka	463
IX.1 Relation de Gibbs-Thomson et diagramme de phase d'un mélange binaire dilué	464
IX.2 Modèle minimal	467
IX.3 Le front plan stationnaire	469
IX.3.a) Condition d'existence	469
IX.3.b) Front plan en croissance directionnelle	470
IX.3.c) Seuils de nucléation : « critères du sous-refroidissement constitutionnel » et de la « surchauffe constitutionnelle »	472
IX.3.d) Les mécanismes de l'instabilité de Mullins-Sekerka	475
IX.3.e) Stabilité linéaire du front plan dans le régime cinétique	476
i) Relation de dispersion générale	477
ii) Stabilité du front plan en croissance libre ($G = 0$)	479
iii) Stabilité du front plan en croissance directionnelle ($G \neq 0$)	481
iv) Nature de la bifurcation cellulaire en croissance directionnelle	485
v) Instabilité de Mullins-Sekerka en fusion directionnelle	487
IX.4 Front plan en régime diffusif ($\Delta < 1$)	488
IX.4.a) Approximation de Zener	488
IX.4.b) Calcul exact dans le cas $\mu = 0$	489
IX.5 Croissance libre d'un germe circulaire dans le régime diffusif ($0 < \Delta < 1$)	491
IX.5.a) Loi d'évolution du rayon en fonction de la sursaturation	491
IX.5.b) Analyse de stabilité linéaire	495
IX.6 Croissance libre d'un germe circulaire dans le régime cinétique ($\Delta > 1$)	496
IX.7 La dendrite d'Ivantsov ($0 < \Delta < 1$)	498

Tome 2

(en préparation)

Cette partie de la table des matières n'est pas définitive mais permettra aux lecteurs de se faire une idée du contenu du deuxième tome.

PARTIE C CRISTAUX LIQUIDES SMECTIQUES ET COLONNAIRES

Chapitre C.I Structure de la phase smectique A et transition vers la phase nématique

L1 Structure lamellaire du smectique A : évidences expérimentales

- I.2 La transition smectique A-nématique : une approche simplifiée
- I.3 Théorie de de Gennes de la transition nématique-smectique A : analogie avec les supraconducteurs
- I.4 Effets prétransitionnels dans la phase nématique
- I.5 Rôle des fluctuations d'orientation du directeur sur l'ordre de la transition : théorie d'Halperin, Lubensky et Ma
- I.6 Autres théories

Chapitre C.II Théorie continue de l'hydrodynamique des smectiques A

- II.1 Description statique
- II.2 Instabilité d'ondulation des couches
- II.3 Équations de l'hydrodynamique des smectiques
- II.4 Propagation du son dans les smectiques
- II.5 Écoulements continus

Chapitre C.III Dislocations, coniques focales et rhéologie des smectiques A

- III.1 Coniques focales
- III.2 Dislocations
- III.3 Comportement rhéologique à faible nombre de Reynolds et théorie de la lubrification
- III.4 Comportement rhéologique à grand nombre de Reynolds
- III.5 Microplasticité

Chapitre C.IV Le smectique C* : un exemple de mésophase ferroélectrique

- IV.1 Y-a-t-il des mésophases ferroélectriques?
- IV.2 Genèse de la phase smectique C*
- IV.3 Mise en évidence de la polarisation spontanée
- IV.4 Mesure et utilisation de la polarisation spontanée
- IV.5 Polarisation spontanée et ichtyologie
- IV.6 Effet visco-électrique
- IV.7 Transition smectique A-smectique C*

Chapitre C.V Les smectiques à joints de grain torsadés (TGB)

- V.1 Modèle de Renn-Lubenski
- V.2 Première mise en évidence de la phase TGB

V.3 Phase TGBA dans d'autres matériaux

V.4 Autres phases TGB

V.5 Élasticité des phases TGB

Chapitre C.VI Les smectiques hexatiques

VI.1 Nature de l'ordre cristallin à deux dimensions

VI.2 Fusion à deux dimensions, théories

VI.3 Mésophases hexatiques

ANNEXE Désordre de Peierls

Chapitre C.VII Le cristal plastique smectique B

VII.1 Structure des phases Smectique B

VII.2 Propriétés élastiques et plastiques

VII.3 Forme d'équilibre d'un germe de smectique B

VII.4 Instabilité d'Herring

VII.5 Instabilité du front smectique A-smectique B en croissance directionnelle

Chapitre C.VIII Films libres smectiques

Chapitre C.IX Les phases colonnaires

IX.1 Structure et propriétés optiques

IX.2 Élasticité

IX.3 Domaines développables

IX.4 Dislocations

IX.5 Mesure des constantes élastiques

IX.6 Instabilités mécaniques

IX.7 Dynamique des instabilités de flambage

IX.8 Diffusion de lumière

Chapitre C.X Croissance d'une phase colonnaire hexagonale

X.1 Diagramme de phase et constantes physiques du matériau

X.2 Croissance dans le régime diffusif ($0 < \Delta < 1$)

X.3 Croissance dans le régime cinétique ($\Delta > 1$)

Chapitre C.XI Cristaux liquides lyotropes