



HAL
open science

Les cristaux liquides en 10 questions

Michel Mitov

► **To cite this version:**

Michel Mitov. Les cristaux liquides en 10 questions. La Recherche, 2002, 2002-04, 352, pp.48-51.
hal-03631631

HAL Id: hal-03631631

<https://hal.science/hal-03631631>

Submitted on 5 Apr 2022

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

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

Les cristaux liquides

Découverts voici à peine plus d'un siècle, ces matériaux au nom paradoxal sont présents dans tout notre environnement. Non seulement dans les écrans plats de nos montres et de nos ordinateurs, mais aussi dans les billets de banque, et jusque dans notre propre corps...

Michel Mitov

est chargé de recherche au centre d'élaboration de matériaux et d'études structurales du CNRS à Toulouse.
mitov@cemes.fr

◆ D'où vient leur nom ?

Hâte-toi lentement, douce violence, un silence éloquent, un inconnu célèbre, des cristaux liquides..., toutes ces expressions ont un point commun : ce sont des oxymorons, assemblages de deux termes contradictoires. En 1922, le cristallographe français Georges Friedel fustigeait ceux qui, acceptant et répandant le terme « cristaux liquides », « n'eurent pas l'occasion de voir par eux-mêmes » ou bien qui, « ayant vu, n'avaient au sujet du cristal et de la matière cristallisée que des idées troubles⁽¹⁾ ! Quelles conditions historiques valurent donc aux cristaux liquides ce nom de baptême si lourd à porter ? En 1888, le botaniste autrichien Reinitzer étudiait à Prague des cristaux de benzoate de cholestérol, extraits de calculs biliaires, qui ne se comportaient pas comme des cristaux habituels : ils fondaient à 145,5 °C en se transformant en un fluide laiteux qui devenait ensuite un liquide parfaitement clair à 178,5 °C. Reinitzer écrivit alors à l'un des cristallographes les plus expérimentés de l'époque, Lehmann, à Aix-la-Chapelle, pour lui faire part de ses surprenantes observations. Lehmann avait construit une platine chauffante qui lui permettait de suivre en direct les changements optiques d'un cristal lorsque la température varie. Il s'en servit pour poursuivre l'observation au microscope des changements d'état du benzoate de cholestérol et d'autres substances, synthétisées ou extraites de diverses plantes : ces produits avaient tous l'aspect caractéristique d'un cristal lorsqu'ils étaient éclairés par une lumière polarisée*, mais ils coulaient aussi comme des liquides ordinaires. La réunion de ces propriétés suggéra à un Lehmann hésitant plusieurs appellations successives : « cristaux coulants » en 1889, « liquides cristallins » en 1890, enfin « cristaux liquides » en 1900.

◆ A quoi ressemblent les molécules d'un cristal liquide ?

Du point de vue de leur forme, les molécules d'un cristal liquide se présentent le plus souvent comme des bâtonnets de quelques nanomètres de longueur et quelques dixièmes de nanomètre de section. Mais d'autres sont des disques, ou des pyramides.

Du point de vue de leur structure chimique, la plupart des cristaux liquides sont constitués de molécules organiques (à base de carbone) qui comportent au moins deux parties différentes par leur structure (une partie rigide et une partie flexible), par leurs propriétés (une partie hydrophile et une autre hydrophobe), par la mixité des groupements associés (un groupe hydrocarboné et un autre fluorocarboné). On retrouve là, après leur nom, le double visage des cristaux liquides qui concilient deux entités que bien des critères semblaient devoir séparer...

Il existe aussi des objets rigides minéraux en forme d'aiguilles, de rubans ou de plaquettes qui, dispersés dans un solvant, présentent des phases cristal liquide. Négligée depuis quelques observations préliminaires en 1925, l'étude des cristaux liquides minéraux a redémarré dans les années 1990⁽²⁾.

◆ Quid du cristal, quid du liquide ?

À l'école, on distingue habituellement trois états fondamentaux de la matière, en se fondant sur l'ordre des molécules : solide cristallin, liquide et gaz. Cette classification est utile pour une première approche, mais il existe de nombreux autres états qui brouillent les frontières : émulsions, gels, polymères, mousses... ou cristaux liquides, tous membres de la grande famille de la matière molle, selon l'expression popularisée par Pierre-Gilles de Gennes*.

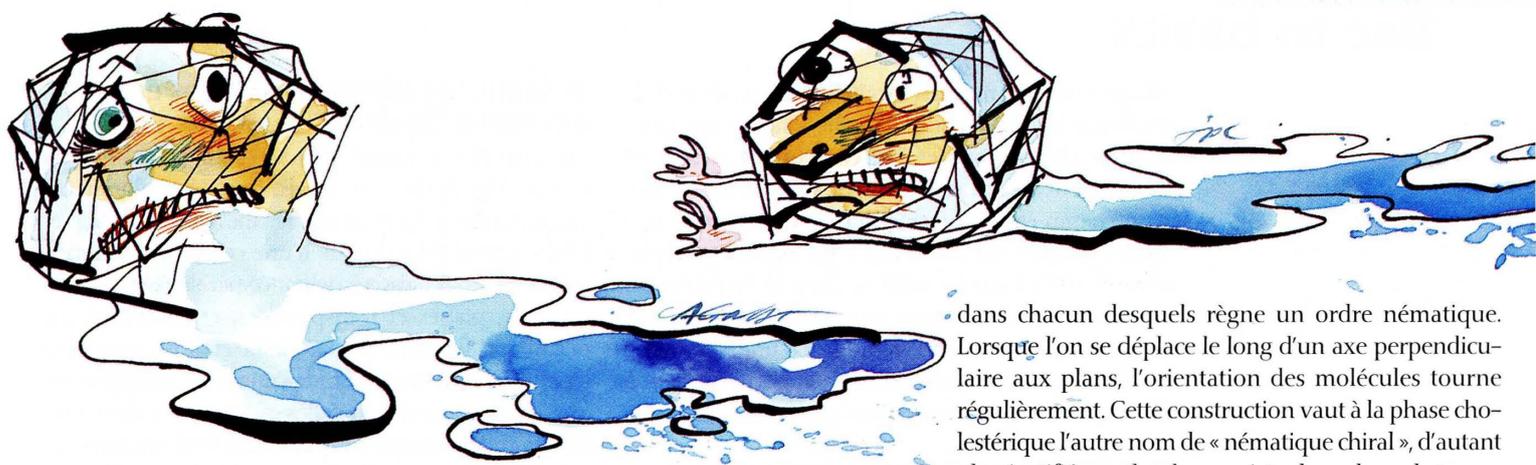
C'est en 1905, et avec l'aide du physico-chimiste Schenck, que Lehmann, après plusieurs polémiques, parvint à convaincre ses collègues que l'état cristal liquide était un état de la matière à part entière, en mettant en évidence des discontinuités dans les transitions de phase. Un cristal est un arrangement ordonné et périodique d'atomes ou de molécules. En moyenne, l'ordre est total, pour la position comme pour l'orientation des molécules. Ces ordres sont complètement perdus dans un liquide. Dans un cristal liquide standard, la situation est intermédiaire (on parle d'ailleurs

*La polarisation de la lumière est l'orientation particulière du champ électrique de l'onde associée par rapport à sa direction de propagation.

*Pierre-Gilles de Gennes est un physicien français né en 1932 qui a reçu le prix Nobel de physique en 1991, en particulier pour ses travaux sur les cristaux liquides et les polymères.

*Une molécule est chirale si elle n'est pas identique à son image dans un miroir.





de mésophases, du grec *mesos*, intermédiaire) : les molécules bâtonnets sont disposées n'importe où mais, tout en se déplaçant les unes par rapport aux autres du fait de l'agitation thermique, elles restent en moyenne parallèles entre elles.

A l'échelle macroscopique, un cristal liquide n'est pas nécessairement... liquide! Le nom se rapporte exclusivement à cet ordre partiel dans l'organisation des molécules.

C'est ainsi que des cristaux liquides peuvent, sans usurper leur nom, revêtir des apparences très diverses : solide, caoutchouteuse, gélatineuse ou pâteuse.

◆ Peut-on les ranger par familles ?

En 1957, G.H. Brown et W.G. Shaw précisent, en se fondant sur les travaux de G. Friedel, A.S. Lawrence et E.E. Jelley, une classification qui se rapporte aux conditions expérimentales permettant d'observer les phases cristal liquide⁽³⁾. Ils distinguent les thermotropes, pour lesquels les mésophases sont révélées lorsque l'on chauffe ou que l'on refroidit la substance, des lyotropes, nécessitant la dilution d'un composé dans un solvant. On parle d'amphotropes lorsque les deux processus sont cumulés au sein d'une même substance.

De son côté, Friedel avait établi une classification reposant sur des critères d'ordre et de symétrie dans les arrangements moléculaires. C'est lors d'un après-midi de jeux avec ses filles, bonnes hellénistes, qu'il baptisa les trois grandes classes de cristaux liquides des noms de nématique, cholestérique et smectique (fig. 1). La phase nématique est la moins ordonnée. Les molécules ont simplement tendance à s'aligner parallèlement les unes aux autres. Observée au microscope à lumière polarisée, cette phase présente souvent des défauts ressemblant à des fils (*nêmatos* en grec).

La phase cholestérique doit son nom à sa découverte dans des dérivés du cholestérol. Elle est faite d'un arrangement en hélice de molécules chirales*. On peut la décrire comme un empilement continu de plans

dans chacun desquels règne un ordre nématique. Lorsque l'on se déplace le long d'un axe perpendiculaire aux plans, l'orientation des molécules tourne régulièrement. Cette construction vaut à la phase cholestérique l'autre nom de « nématique chiral », d'autant plus justifié que la phase existe dans des substances étrangères au cholestérol. Friedel présentait élégamment la phase cholestérique comme « une manière d'être spéciale de la phase nématique ».

La phase smectique, enfin, a été nommée ainsi à cause de propriétés mécaniques proches de celles d'un film savonneux (savon se dit *smectos* en grec). Il existe en fait de nombreuses sous-familles de smectiques. Dans le cas le plus simple, le smectique A, les molécules sont alignées parallèlement les unes aux autres comme dans les nématiques, mais en étant regroupées en couches parallèles régulièrement espacées. Au sein de chaque couche les molécules sont disposées aléatoirement.

◆ Comment réagissent-ils à une tension électrique ?

Nous répondrons à cette question pour le cas le plus élémentaire, celui de nématiques constitués de molécules bâtonnets. La plupart des cristaux liquides sont composés de molécules neutres. Cependant, suivant la nature des atomes qui composent celles-ci, elles peuvent être chargées positivement à une extrémité et négativement à l'autre. Cette séparation de charges permet d'assimiler la molécule bâtonnet à un dipôle électrique* permanent. Les dipôles sont orientés au hasard et, pour chaque molécule orientée dans un sens, on en trouve une autre orientée dans le sens inverse. En présence d'un champ électrique, en revanche, les parties chargées d'une molécule subissent des forces opposées, proportionnelles à leur

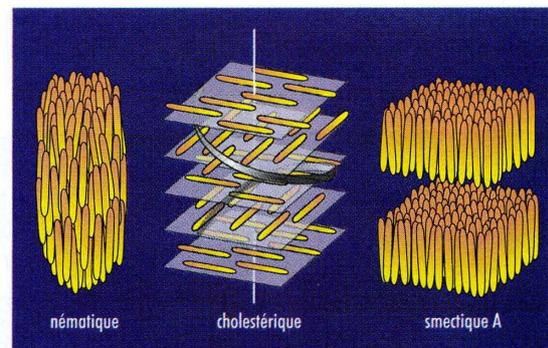


Figure 1. Les molécules bâtonnets de cristaux liquides sont parallèles entre elles, sans autre arrangement pour la phase nématique ; dans des plans pour la phase cholestérique, avec une rotation en hélice de la direction préférentielle ; et en couches pour la phase smectique A.

*Un dipôle électrique est constitué de deux charges ponctuelles égales et de signes opposés.

(1) G. Friedel, *Annales de physique*, série 9, 18, 275, 1922.

(2) H. Zocher, *Z. Anorg. Allg. Chem.*, 147, 91, 1925 ; J.-C. Gabriel et P. Davidson, *Advanced Materials*, 12, 9, 2000.

(3) G.H. Brown et W.G. Shaw, *Chemical Reviews*, 57, 1050, 1957.

charge et au champ, qui entraînent une rotation de la molécule jusqu'à ce que le dipôle s'aligne parallèlement au champ. Pour les molécules qui ne présentent initialement aucune séparation de charges, la présence d'un champ électrique crée tout de même des forces sur les charges des atomes, et il en résulte un déplacement des charges positives dans la direction du champ électrique et des charges négatives à l'opposé, ce qui induit un dipôle électrique. La fin de l'histoire est la même : les molécules sont orientées par le champ électrique suivant une direction particulière.

◆ Réfléchissent-ils la lumière ?

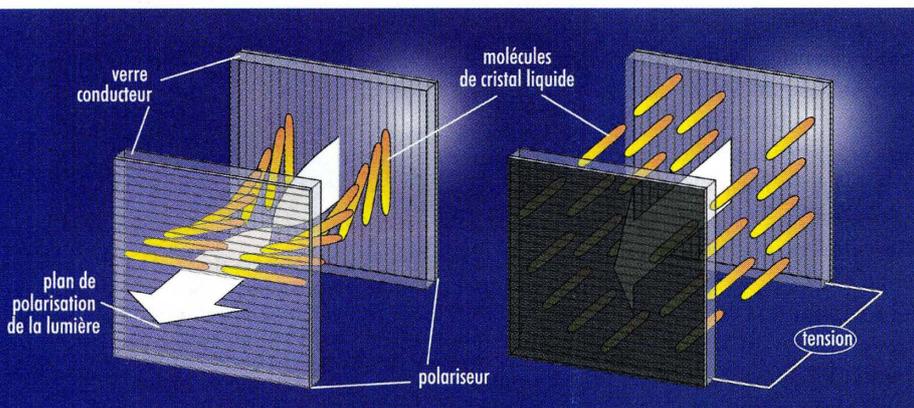
Les cristaux liquides ont plusieurs façons d'interagir avec la lumière : en la réfractant, en en réfléchissant une partie, en la diffusant dans toutes les directions de l'espace ou en modifiant sa polarisation⁽¹⁾. Les cristaux liquides cholestériques ont l'originalité de réfléchir la lumière de façon sélective. Considérons une lumière incidente contenant plusieurs longueurs d'onde et non polarisée. Plaçons un échantillon de cholestérique entre deux surfaces planes de verre de façon à ce que l'axe de l'hélice soit perpendiculaire aux surfaces. Le cholestérique renvoie de la lumière polarisée à une seule longueur d'onde, proportionnelle au produit du pas de l'hélice par le cosinus de l'angle que forme le faisceau incident avec la direction perpendiculaire à la surface de l'échantillon. Autrement dit, la couleur du cholestérique dépend à la fois du pas de l'hélice et de l'angle sous lequel on le regarde. Cette lumière réfléchie a une largeur spectrale d'une cinquantaine de nanomètres lorsque la longueur d'onde moyenne est dans le domaine visible. Tout faisceau lumineux dont la longueur d'onde est hors de cette bande traverse le cholestérique sans autre forme de procès, si ce n'est un peu d'absorption. De plus, la lumière réfléchie est, elle, polarisée circulairement, et il existe une relation entre son sens de polarisation et le sens de l'hélice (gauche ou droit) selon une correspondance propre aux cholestériques. En effet, un miroir ordinaire réfléchit une onde polarisée circulairement en en renversant le sens, tandis qu'une onde circulaire droite est réfléchie par une hélice cholestérique droite (et transmise par une hélice gauche) en conservant son sens.

La Recherche a publié :

(1) M. Mashaal et C. Cohen-Tannoudji, « La lumière », avril 1996.

(2) M.-H. Grosbras et A. Adoutte, « La cellule », juin 1996.

Figure 2. La lumière qui pénètre dans un écran à cristaux liquides, dont les faces portent deux filtres polariseurs, ne ressort que si la disposition des molécules bâtonnets en quart d'hélice permet la rotation de son plan de polarisation (à gauche). L'application d'une tension (à droite) bouleverse cet ordre et éteint l'écran.



◆ Comment fabrique-t-on des écrans à cristaux liquides ?

Un écran plat à cristaux liquides est une mosaïque de points élémentaires, des pixels, dont l'état, allumé ou éteint, permet d'écrire un chiffre, une lettre ou un signe. Chaque pixel est constitué d'une cellule de quelques micromètres d'épaisseur délimitée par deux électrodes en verre, planes et transparentes, et contenant un nématique (fig. 2). Le verre est traité et brossé pour que les molécules de cristal liquide s'orientent parallèlement aux électrodes près de celles-ci, et toutes dans une direction déterminée. Les électrodes sont orientées de telle façon que cette direction soit décalée de 90° entre les deux faces de la cellule, et l'épaisseur de la cellule est ajustée pour que le nématique y adopte une structure en quart d'hélice. Dernière pièce nécessaire au montage : on accole sur la face externe de chaque électrode un polariseur dont la direction est parallèle à celle adoptée par les molécules sur l'électrode. Les directions des polariseurs forment donc un angle de 90°.

Lorsqu'un faisceau de lumière blanche non polarisée arrive sur la face avant de la cellule, seule une onde polarisée de façon rectiligne ressort de l'autre côté. A mesure que cette onde progresse dans la cellule, sa direction de polarisation tourne, en suivant l'orientation en quart d'hélice du nématique torsadé : le cristal liquide remplit le rôle d'un guide d'onde. Enfin, l'onde arrive polarisée parallèlement à la direction du second polariseur, ce qui lui permet de sortir librement de la cellule. Mais, si le nématique a été bien choisi, lorsqu'une tension dépassant une valeur seuil est appliquée entre les électrodes, les molécules s'alignent perpendiculairement à celles-ci (suivant la direction du champ électrique) : la structure en quart d'hélice disparaît alors, et la direction de polarisation de la lumière traversant la cellule ne tourne pas. La lumière est bloquée par le polariseur de sortie qui l'absorbe. Un tel écran peut être éclairé par la lumière ambiante (un miroir est alors placé sur la face arrière de l'écran) ou par une source lumineuse arrière. Troisième possibilité : un miroir parabolique associé à une lampe permet les deux modes de fonctionnement. On commande donc l'allumage et l'extinction d'un pixel par la tension électrique. Notons qu'aucun courant électrique ne traverse les pixels (ce qui dégraderait d'ailleurs le matériau).

◆ Et les écrans couleurs ?

Pour des téléviseurs plats, on utilise d'autres types de cristaux liquides, dont la rapidité à réagir face à une excitation électrique est adaptée aux exigences de la cadence vidéo, et qui permettent aussi de moduler par la tension la lumière qui traverse la cellule. Les couleurs fondamentales rouge, vert et bleu sont obtenues par l'ajout de filtres colorés sur les pixels de cristaux liquides. Ces écrans nécessitent une électronique de commande perfectionnée et onéreuse : chaque pixel est équipé d'un transistor, et il faut entre cent mille et un million de pixels pour élaborer un écran de un mètre de diagonale.



dans le spectre solaire seraient réglables *via* la tension électrique. En régulant ainsi les flux thermiques, on économiserait de l'énergie. Cette direction de recherche implique que l'on parvienne à élargir d'un facteur dix la bande de réflexion des cholestériques⁽⁴⁾.

◆ Que sont les cristaux liquides biologiques ?

Le premier cristal liquide découvert était, on l'a vu, un extrait biologique. Les cristaux liquides sont en effet omniprésents dans les tissus vivants. Les cellules passent une bonne partie du temps à échanger des substances avec leur environnement. Leur structure doit donc être assez fluide pour permettre la diffusion de molécules et d'ions tout en conservant un degré d'ordre suffisant pour, par exemple, sélectionner ceux qui traverseront ou non la membrane cellulaire⁽⁵⁾. Cette double exigence est remplie par des cristaux liquides dont le solvant est l'eau : c'est ainsi que la bicouche lipidique de la membrane cellulaire possède un arrangement lamellaire. Plus généralement, les cristaux liquides biologiques sont présents à différentes échelles et remplissent différentes fonctions. Les longs filaments faits de protéines qui constituent les muscles ont un ordre nématique ou smectique⁽⁵⁾. En analysant l'agencement des fibrilles de la carapace de nombreux arthropodes, comme les cétoines chez les scarabées, on trouve souvent des arrangements cholestériques. L'ADN *in vivo* comme *in vitro*, dans son état condensé ou en solution, présente une large variété de mésophases constituant de bons modèles pour comprendre l'ordre qui se crée spontanément entre molécules⁽⁶⁾. Une meilleure connaissance de ces ordres supramoléculaires ouvre de nouvelles perspectives sur la régulation de l'activité de la molécule d'ADN.

Des liens ont aussi été établis entre l'apparition de certaines maladies et les altérations d'un ordre cristal liquide local. Ainsi, dans le cas du cancer, l'un des premiers signes présentés par une cellule maligne est une perte d'adhérence vis-à-vis de ses voisines, ce qui facilite ultérieurement la migration indésirable de cellules qui, en conditions normales, ne se déplacent pas. Ces mécanismes font intervenir un changement de la composition de la membrane cellulaire mais aussi de sa structure mésomorphe⁽⁷⁾. Le fonctionnement normal des structures biologiques repose sur le compromis que fait la nature entre ordre et désordre, compromis qui est l'essence même d'un état cristal liquide. ■

Pour en savoir plus

- Michel Mitov, *Les Cristaux liquides*, PUF, 2000.
- Pierre-Gilles de Gennes et Madeleine Veyssié, *cédérom Matière molle*, Arte Editions, 1998.
- Pierre-Gilles de Gennes et Jacques Badoz, *Les Objets fragiles*, Presses Pocket, 1996.
- M. Daoud et C. Williams (dir.), *La Juste Argile*, Les Editions de physique, 1995.

◆ Que fabrique-t-on d'autre avec des cristaux liquides ?

Dans les télécommunications, des valves optiques utilisant des cristaux liquides offrent la possibilité de moduler très rapidement (à l'échelle de la microseconde) l'intensité, la phase ou la polarisation d'une onde lumineuse. La variation de la couleur des cholestériques, en fonction de la température ou de la pression appliquée sur un objet, est aussi mise à profit dans des détecteurs.

La force des polymères cristaux liquides est de combiner les propriétés spécifiques des cristaux liquides, qu'elles soient mécaniques ou optiques, avec la forme solide ou malléable du matériau. Le kevlar est un polymère nématique alliant la robustesse à la légèreté dans des casques, planches à voile ou gilets pare-balles. Une firme automobile utilise un polymère cholestérique pour offrir de belles couleurs irisées aux carrosseries ; la propriété de changement de couleur sous l'angle d'observation reste en option...

Mais le secteur industriel qui utilise le plus de cristaux liquides demeure celui de la cosmétologie et de la pharmacologie. La phase cholestérique prête ses reflets chatoyants à plusieurs crèmes pour le contour des yeux. Pour certains produits, la stabilisation d'émulsions, le principe de base d'un démaquillant ou encore la solubilisation de vitamines dans un gel aqueux sont apportés par la structure cristal liquide du produit, au-delà de sa composition chimique : seule une structure lamellaire de type smectique offre les performances en question qui sont absentes ou atténuées dans la version désordonnée du gel.

D'autres applications concernent le domaine alimentaire, les lentilles de contact, les arts décoratifs, la sécurisation de billets de banque, voire le bâtiment. Des vitrages à opacité variable faits d'inclusions de nématique dans un film de polymère, et passant d'un état opaque à un état transparent par application d'une tension, sont disponibles et prêts à se substituer aux stores. Plus ambitieusement, en recourant à des cholestériques pour leur propriété de réflexion de la lumière, on peut imaginer que des vitrages puissent aussi filtrer une bande de longueurs d'onde dont la largeur comme la situation

(4) M. Mitov, A. Boudet et P. Sopéna, *European Physical Journal B*, 8, 327, 1999.

(5) Y. Bouligand, *Solid State Physics*, suppl. 14, 259, 1978.

(6) F. Livolant et A. Leforestier, *Progress in Polymer Science*, 21, 1115, 1996.

(7) P.J. Collings, *Liquid Crystals : Nature's Delicate Phase of Matter*, Adam Hilger, 1990.

