Maurice Kleman et la physique des défauts

Une approche topologique toujours d'actualité

Emmanuelle Lacaze[1] (emmanuelle.lacaze@insp.jussieu.fr), **Patrick Davidson** [2] (patrick.davidson@universite-paris-saclay.fr), **Jacques Miltat**[2], **Pawel Pieranski** [2], **André Thiaville** [2], **Christophe Blanc**[3] et **Claire Meyer**[4]

(1) Institut des nanosciences de Paris (UMR7588 CNRS et Sorbonne Université), 4 place Jussieu, 75252 Paris cedex 05

(2) Laboratoire de physique des solides (UMR8502 CNRS et Université Paris-Saclay), 1 rue Nicolas Appert, 91405 Orsay

(3) Laboratoire Charles Coulomb (UMR5221 CNRS et Université de Montpellier), 34095 Montpellier

(4) Physique des systèmes complexes (UR4663 Université de Picardie Jules Verne), 33 rue Saint-Leu, 80039 Amiens

Les défauts sont au cœur de l'œuvre que nous a léguée Maurice Kleman. Il s'agit ici, au-delà des dislocations (voir glossaire) bien connues pour leur rôle dans la plasticité des solides, de défauts dans des organisations très diverses de la matière telles que les textures ferromagnétiques, les cristaux liquides, les phases lamellaires et les quasi-cristaux. De par sa généralité, l'approche topologique de Maurice Kleman a profondément renouvelé la physique des défauts dans de nombreux domaines de la matière condensée.

Matériaux magnétiques

Les travaux de Maurice Kleman sur les défauts ont débuté par le magnétisme, dès sa thèse préparée à l'IRSID (Institut de recherche de la sidérurgie), sous la direction de Jacques Friedel et soutenue en 1967. Au-delà des échantillons étudiés, le sujet de cette thèse était la prise en compte globale de l'effet appelé magnétostriction, la déformation anisotrope d'un matériau magnétique en fonction de la direction de son aimantation.

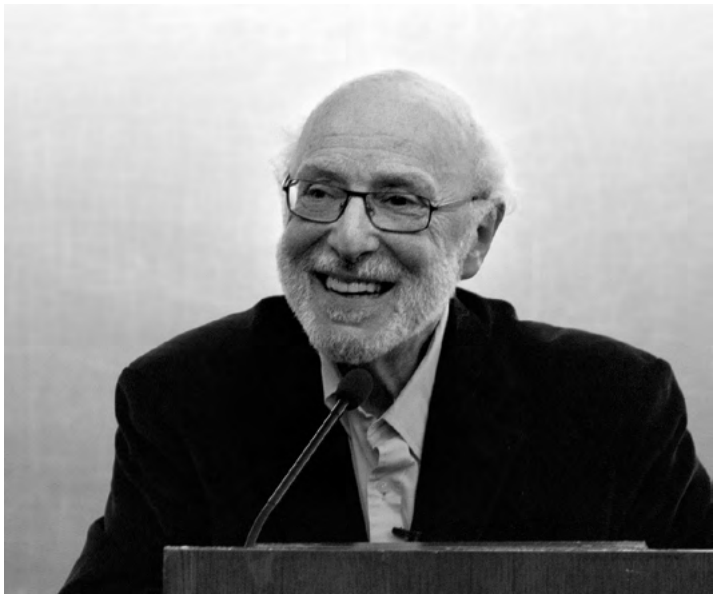
Dans un matériau ferromagnétique, les interactions quantiques (appelées échange) sont responsables du parallélisme local des moments magnétiques des atomes. La densité volumique de moment magnétique s'appelle l'aimantation, et les zones à aimantation uniforme des domaines magnétiques. Selon la structure cristalline du matériau, l'aimantation s'oriente de préférence selon des directions cristallographiques spécifiques. Ainsi, dans le fer, l'élément natif de la sidérurgie dont le réseau cristallin est cubique, les directions faciles d'aimantation sont les côtés du cube. La raison pour laquelle un échantillon fini ne se trouve pas tout simplement aimanté uniformément selon une direction facile est l'existence d'un champ magnétique interne, appelé champ démagnétisant, qui résulte des équations de Maxwell et est analogue au champ dépolarisant dans un diélectrique. La minimisation de l'ensemble des énergies d'échange, d'anisotropie cristalline et du champ démagnétisant conduit à subdiviser un échantillon fini et de taille macroscopique en domaines aimantés selon les directions faciles, avec une aimantation tangente aux surfaces de ces domaines, les zones de transition entre domaines étant appelées parois. Cette approche néglige cependant les phénomènes associés à la magnétostriction, cette différence subtile de symétrie cristalline qui existe entre la phase ferromagnétique et la phase paramagnétique (où l'orientation des moments est désordonnée). Dans le fer, la maille s'allonge relativement de quelques 10^{-5} dans la direction de l'aimantation, et se contracte de la moitié selon les deux directions orthogonales.

Dans la limite de parois d'épaisseur nulle, les réseaux cristallins des deux domaines adjacents à une paroi à 180° (fig.1a) peuvent s'adjoindre sans contraintes, parce qu'ils subissent la même déformation magnétostrictive. Tel ne saurait être le cas pour la paroi à 90° de la figure 1b. Une telle paroi est dite élastiquement incompatible, au contraire de la paroi à 180°, dite compatible. Une paroi à 90° peut néanmoins se révéler compatible lorsque le plan de paroi bissecte les vecteurs aimantation des domaines adjacents (fig. 1c), au prix d'une légère rotation des plans cristallins. Aucune de ces propriétés n'avait échappé à Louis Néel (prix Nobel de physique 1970), qui démontra que la magnétostriction stabilise une paroi à 180° d'épaisseur finie, laquelle aurait tendance à se subdiviser en deux parois à 90° en l'absence de magnétostriction.

>>>

Article disponible sur le site https://www.refletsdelaphysique.fr ou https://doi.org/10.1051/refdp/202683032

MAURICE KLEMAN



source : Wikipedia Creative Commons

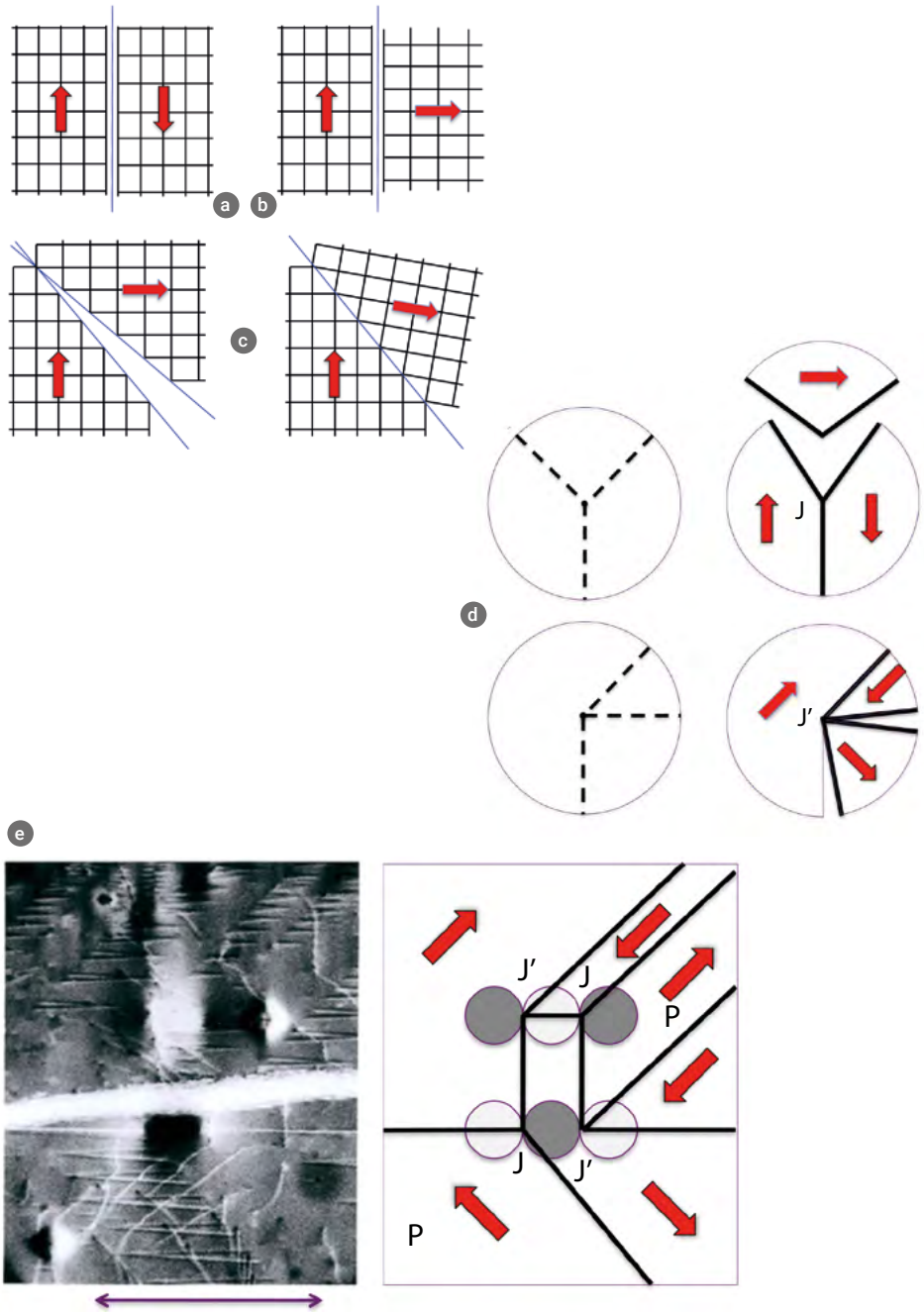
Né en 1934 à Paris et décédé le 29 janvier 2021, Maurice Kleman a consacré toute sa carrière au CNRS à l'étude expérimentale et théorique des défauts. Ses travaux ont débuté par le magnétisme, mais une grande partie de l'héritage scientifique de Maurice Kleman concerne les défauts topologiques dans les cristaux liquides. Il commença à les étudier en 1969, date à laquelle il rejoignit le Laboratoire de Physique des Solides (LPS) à l'Université Paris-Sud (aujourd'hui Paris-Saclay). À cette époque d'*anni mirabiles* dans un environnement stimulant et compétitif, de jeunes équipes, dirigées par Georges Durand, Madeleine Veyssié, Étienne Guyon et Maurice Kleman lui-même, se lancèrent avec fougue dans l'exploration du monde des cristaux liquides. Les progrès furent spectaculaires, grâce entre autres aux interactions permanentes avec Jacques Friedel et Pierre-Gilles de Gennes. Ces travaux permirent en particulier à Maurice Kleman de proposer avec son collègue Gérard Toulouse une classification générale des défauts topologiques dans les systèmes ordonnés [1].

En 1993, Maurice Kleman quitte le LPS pour rejoindre le laboratoire de Minéralogie et Cristallographie de Paris. Localisé à Jussieu, ce laboratoire est l'héritier direct du laboratoire de Minéralogie de la Sorbonne. C'est autour d'un groupe expérimental resserré que Maurice Kleman y dirige pendant une dizaine d'années plusieurs thèses principalement centrées sur les systèmes lyotropes auto-organisés.

Fin 2007, Maurice Kleman rejoint l'Institut de physique du Globe de Paris où ses réflexions le portent vers les défauts en cosmologie et les champs magnétiques solaires. Après cette brève incursion dans les sciences de l'Univers, sa fin de carrière est marquée par un retour aux cristaux liquides, notamment à la suite de la découverte expérimentale d'une nouvelle phase nématique en 2011, la phase nématique *twist-bend* (N_{TB}).

Maurice Kleman aura marqué la physique des défauts et leur utilisation en matière condensée, particulièrement dans les domaines du magnétisme et des cristaux liquides. Ses contributions ont été reconnues en France par divers prix comme la médaille d'argent du CNRS en 1975, le prix Jean Ricard de la Société Française de Physique en 1980 ou encore un grand prix de l'Académie des sciences (prix du Commissariat à l'énergie atomique en 2007). Il fut internationalement reconnu, comme le montrent ses multiples invitations en cours de carrière, et son élection, en 2018, comme Membre honoraire étranger de l'Académie américaine des Arts et des Sciences.

Tout au long de sa carrière, Maurice Kleman a eu à cœur de transmettre ses connaissances en rédigeant des ouvrages. Si son livre *Points, lignes et parois*, publié en 1977 et traduit en anglais en 1983, demeure encore à ce jour une référence incontournable [2], les dernières années de sa carrière furent également marquées par des réflexions élargies. Une collaboration très féconde avec Oleg Lavrentovich (un chercheur ukrainien, aujourd'hui professeur à l'Université de Kent, Ohio, USA) déboucha ainsi sur *Soft Matter Physics: An Introduction* [3]. Cet ouvrage contient des réflexions plus générales sur les structures et les défauts de la matière condensée et se trouve actuellement dans toutes les bibliothèques universitaires. Maurice Kleman publia également plusieurs revues, comme celle rédigée en 2008 avec Jacques Friedel [4] qui propose de nouvelles réflexions sur le processus de Volterra, un des aspects les plus fondamentaux de la théorie des défauts continus. Enfin, une autobiographie [5] pose un regard sans concession sur sa vie et son parcours scientifique.



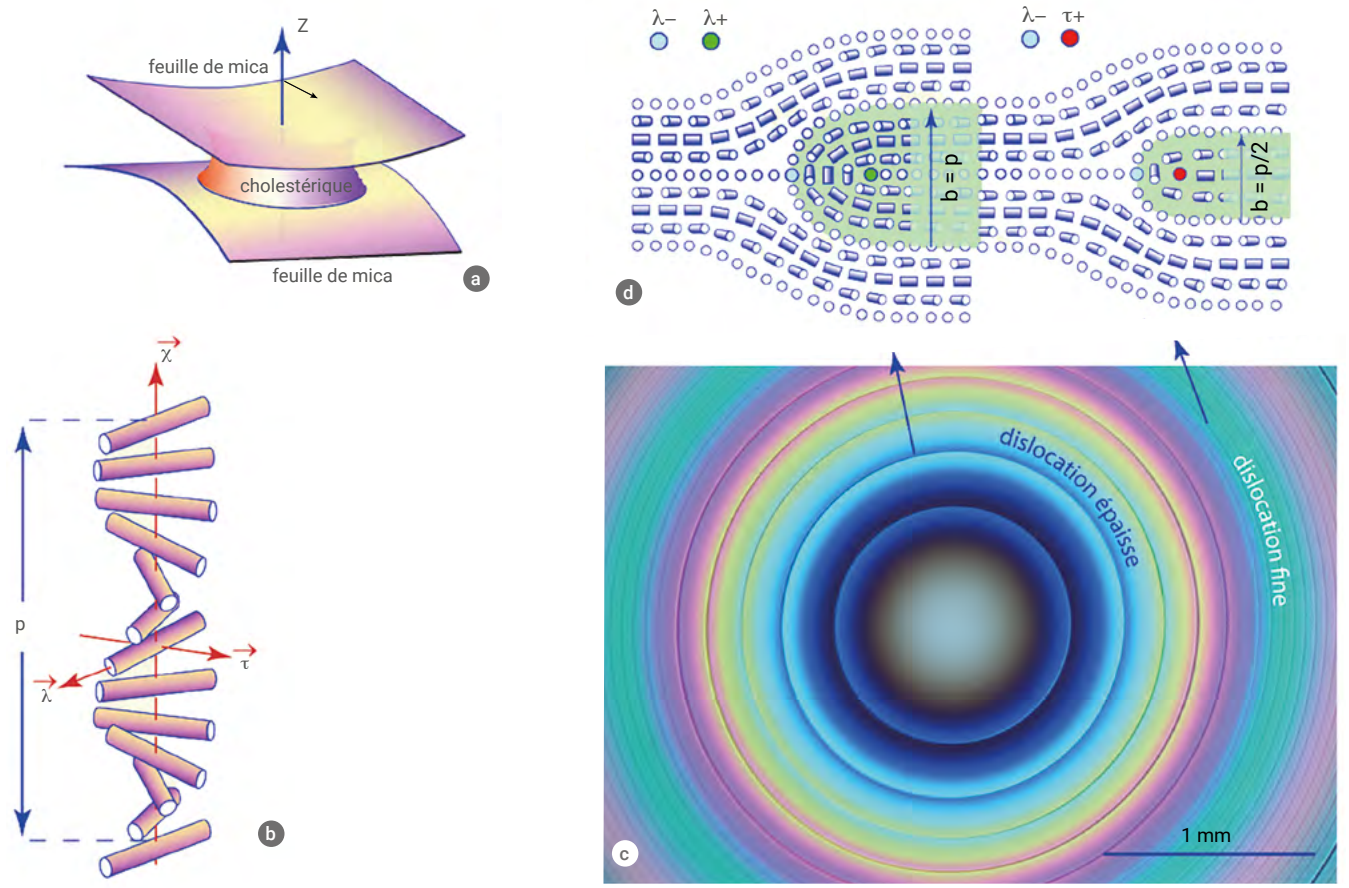
1. a) Paroi à 180° élastiquement compatible dans la limite d'une épaisseur nulle.
b) Paroi à 90° élastiquement incompatible.
c) Paroi à 90° compatible après rotation relative des domaines adjacents.
d) Deux jonctions de parois dans le fer, une à 180° et deux à 90°, pour lesquelles la magnétostriction conduit à un excès (haut, jonction J) ou un déficit de matière (bas, jonction J'), ce qui implique la présence d'un défaut de rotation appelé *disinclinaison*. Les dessins sont représentatifs d'une structure en domaines observable dans une lamelle de fer parallèle à une face du cube élémentaire (fig.1e). Les directions de facile aimantation dans le plan sont les directions ici dessinées à 45°. Les flèches indiquent la direction de l'aimantation dans les domaines.
e) Gauche : observation par diffraction des rayons X (méthode de topographie X) dans une lamelle monocristalline de fer (avec 3.5% de silicium) d'un fort contraste noir-blanc ou blanc-noir associé à la présence des disinclinaisons J et J'. Les objets clairs curvilignes isolés sont des dislocations et les défauts notés P, conduisant aussi à un contraste noir/blanc, sont des précipités. La bande transversale blanche correspond à un sous-joint de grain et les structures en triangles aplatis à des domaines magnétiques superficiels dont seule une branche est visible en raison des conditions de diffraction (échelle: 500 µm). Droite : schéma des domaines principaux, des positions des disinclinaisons J et J', des zones contrastées du fait du magnétisme ainsi que des défauts ponctuels P.
(Adapté de J.E.A. Miltat et M. Kleman, "Magnetostrictive displacements around a domain wall junction: elastic field calculation and application to x-ray topography", *Philosophical Magazine* **28** (1973) 1015)

>>>

La figure 1d propose un schéma de la déformation magnétostrictive des domaines adjacents à la jonction d'une paroi à 180° et de deux parois à 90°, toutes élastiquement compatibles au sens ci-dessus. En raison d'un excès ou d'un manque de matière, selon la géométrie, les trois domaines ne peuvent, après déformations magnétostrictives indépendantes, être adjoints sans contraintes additionnelles. La jonction de ces trois parois est donc source d'incompatibilité élastique additionnelle.

Maurice Kleman a, dans un premier temps, proposé une théorie générale prenant en compte les sources d'incompatibilité élastique d'origine magnétostrictive. Dans le cas des jonctions de la figure 1d, les contraintes additionnelles nécessaires au recollement des trois domaines sont assimilables à celles créées par un défaut de rotation, ici, une *disinclinaison* (voir glossaire) coin (ou dièdre) dont l'angle est très faible, car donné par la magnétostriction. La figure 1e présente une observation des déformations liées à de telles structures magnétiques, via les rayons X (méthode de topographie). Observation et théorie s'y rejoignent.

La théorie conjointe du magnétisme et de l'élasticité élaborée par Maurice Kleman a ainsi permis de calculer la structure magnétique au voisinage d'une dislocation, l'interaction entre dislocations et parois magnétiques, et plus généralement d'estimer la contribution élastique à l'énergie de structures magnétiques périodiques. On a tendance à penser que, du fait de la faiblesse de la magnétostriction dans les matériaux courants, ses effets sont négligeables en dehors de quelques cas très particuliers. Toutefois, les études récentes des structures magnétiques dans les antiferromagnétiques (l'échange y favorise des moments antiparallèles, d'où l'absence d'aimantation et la disparition de l'énergie démagnétisante à l'ordre le plus bas) ont montré le grand rôle que la magnétostriction y jouait. De même, les études récentes en vue d'utiliser des ondes de *spin* couplées à des ondes élastiques pour le transfert et le traitement de l'information, font revenir sur le devant de la scène l'étude couplée du magnétisme et de l'élasticité. Les premiers travaux de Maurice Kleman pourraient donc retrouver une actualité nouvelle.



2. Dislocations dans un cristal liquide cholestérique.
a) Confinement d'une goutte cholestérique entre deux feuilles de mica cylindriques croisées. La distance verticale h_{min} entre les cylindres est variable. La photo de la figure 2c a été prise avec h_{min}=0.
b) Orientations des molécules dans une hélice cholestérique le long de l'axe χ de pas *p*. Les axes λ et τ sont respectivement parallèle et perpendiculaire aux molécules. Dans les substances cholestériques pures, le pas p est de l'ordre de quelques dixièmes de micromètre, mais on peut l'allonger à volonté en mélangeant un composé nématique (ici 5CB) avec une substance chirale (ici CB15). La photo de la figure 2c a été obtenue avec un mélange de 4% de CB15 dans 5CB pour lequel p=5 µm.
c) Vue au microscope de la goutte confinée, qui révèle la présence des lignes fines et épaisses correspondant à deux types de dislocations ; les couleurs sont des teintes d'interférences.
d) Orientations moléculaires au voisinage des lignes épaisses (dislocations de vecteur de Burgers $b = p$ correspondant à un couple de disinclinaisons appelées λ- et λ+) et fines (dislocations de vecteur de Burgers $b = p/2$ correspondant à un couple de disinclinaisons appelées λ- et τ+). Les dénominations λ-, λ+ et τ+ décrivent la façon dont tourne le bâtonnet représentant l'orientation moyenne de la molécule autour des lignes de disinclinaison qui sont perpendiculaires à la figure et indiquées par les disques respectivement en bleu clair, vert et rouge.

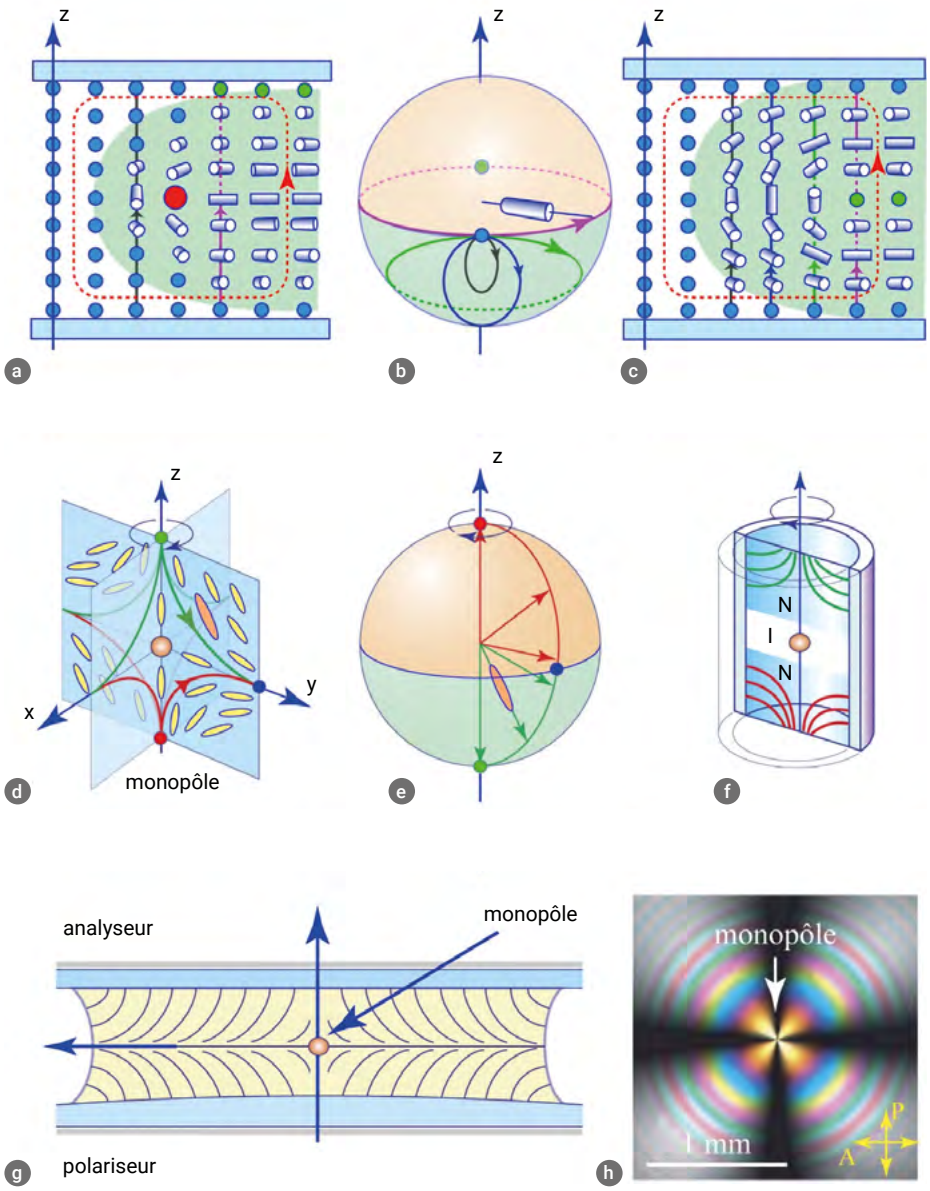
Cristaux liquides

Une autre grande partie de l'héritage scientifique de Maurice Kleman concerne les défauts topologiques dans les cristaux liquides. Les cristaux liquides sont des phases intermédiaires entre le liquide usuel et le solide cristallin observées pour de nombreuses molécules organiques en forme de bâtonnet.

Le tout premier article de Maurice Kleman sur les cristaux liquides, cosigné avec Jacques Friedel en 1969 et intitulé « Lignes de dislocations dans les cholestériques », fut inspiré par les observations de François Grandjean, Pierre Chatelain, René Cano, ainsi que celles du Groupe de cristaux liquides d'Orsay, de lignes de défauts dans des phases cristal-liquides appelées « cholestériques » confinées dans une fente d'épaisseur variable. Les phases cholestériques sont constituées de molécules chirales dont les orientations présentent une modulation hélicoïdale (fig. 2b). En l'absence de surfaces, les molécules allongées du cholestérique forment ainsi une hélice de pas *p* uniforme (fig. 2b), mais dans une fente, le pas doit s'adapter à l'épaisseur disponible localement. Ainsi, le confinement entre deux feuilles de mica (fraichement clivées) cylindriques et orthogonales l'une à l'autre (fig. 2a) provoque l'apparition d'un système de lignes circulaires bien visibles au microscope, comme le montre l'image de la figure 2c.

Kleman et Friedel ont expliqué que ces lignes correspondent aux dislocations de la structure périodique du cholestérique (fig. 2d) : le vecteur de Burgers qui décrit la dislocation a, pour les lignes fines, la valeur $b = p/2$, et pour les lignes épaisses, $b = p$. Ils ont également montré comment chaque dislocation se décompose en un couple de disinclinaisons, celles-ci étant de deux types, λ et τ (fig. 2d). Les champs des orientations moléculaires au voisinage des disinclinaisons des deux types sont représentés sur les schémas de la figure 2d où les cercles bleus, verts et rouges indiquent les lignes de disinclinaisons λ+, λ– et τ+ orthogonales au plan du dessin. Remarquons que les disinclinaisons τ ont un cœur qui possède une singularité topologique du champ d'orientation (fig. 3a) tandis que les

>>>



3. Comparaison des topologies des lignes de disinclinaison et des monopôles.
a) Orientations moléculaires au voisinage d'une ligne de disinclinaison dite de π : l'orientation moyenne des molécules est représentée par des cylindres. La ligne de disinclinaison perpendiculaire au plan du dessin est indiquée par le point rouge. Ce point est une singularité topologique car sur tout circuit autour de ce point, comme celui en pointillés, l'orientation des molécules tourne de π autour de l'axe z. Ce champ d'orientations est topologiquement équivalent à celui de la dislocation b = p/2 de la figure 2d.
b) Application du champ d'orientation des molécules de la figure 3a sur la sphère de rayon unité. Les points bleu et vert renvoient aux figures 3a et 3c. Les circuits fermés, en rose, vert, bleu et noir, correspondent aux orientations moléculaires sur les trajectoires verticales de la même couleur dans les figures 3a et 3c.
c) Orientations moléculaires au voisinage d'une ligne de disinclinaison dite de 2π : sur le grand circuit en pointillés, l'orientation des molécules tourne de 2π autour de l'axe z. Ce champ d'orientation des molécules est continu, sans singularité topologique. Il est topologiquement équivalent à celui de la dislocation b = p de la figure 2d.
d) Orientations moléculaires au voisinage d'un monopôle nématique.
e) Application du champ d'orientation moyenne des molécules du monopôle sur la sphère de rayon unité. Les points rouge, vert et bleu renvoient à la figure 3d.
f) Génération d'un monopôle lors de la transition I/N (isotrope/nématique) dans un tube capillaire.
g) Orientation moyenne des molécules (montrée par les lignes bleues) dans une goutte nématique confinée entre une lame et une lentille de grand rayon de courbure.
h) Vue du monopôle au microscope entre polariseur et analyseur croisés, qui révèle l'anisotropie optique. (Voir aussi l'article P. Peranski, « Cristaux liquides : l'univers métastable des monopôles nématiques », *Reflets de la Physique* **53** (2017) 6).

>>>
disinclinaisons λ en sont dépourvues (fig. 3c). Le modèle de Kleman et Friedel avec sa nomenclature reste en vigueur aujourd'hui.

Après ce premier article générique, Maurice Kleman poursuivit le travail sur les dislocations dans les cholestériques avec Patricia Cladis et, simultanément, avec Claudine Williams et Pawel Pieranski. Il s'intéressa aussi aux défauts ponctuels, appelés monopôles, des phases cristal-liquides dites « nématiques ». Ces phases sont caractérisées par des molécules toutes orientées dans la même direction. Les monopôles, à la différence des lignes de disinclinaisons omniprésentes dans les phases nématiques (fig. 3a), sont très rares et ceci pour des raisons topologiques. En effet, les disinclinaisons sont générées facilement par la coalescence de trois gouttelettes nématiques voisines lors de la transition de phase du premier ordre du liquide usuel vers la phase nématique (fig. 3c). La genèse d'un monopôle pendant cette transition n'est par contre possible qu'à la condition qu'une surface puisse imposer en plus l'orientation moléculaire de part et d'autre du monopôle. Il faut donc que la phase nématique soit confinée dans un tube capillaire (fig. 3f) ou entre deux surfaces très proches (figures 3g et 3h).

Phases lamellaires

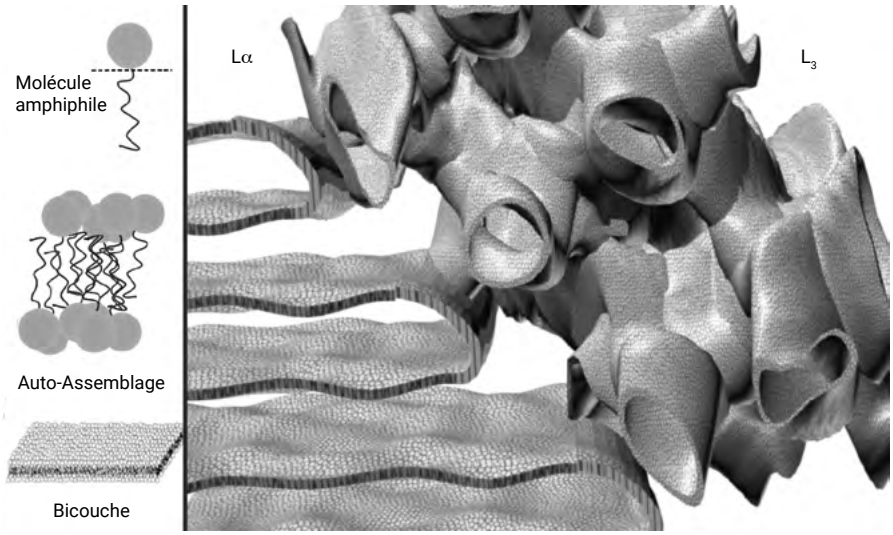
Maurice Kleman a étudié également les cristaux liquides lyotropes (voir glossaire) auto-organisés. Ces systèmes sont des mélanges de tensioactifs et de solvants qui s'assemblent spontanément et présentent un certain ordre à l'échelle mésoscopique. De nombreuses phases cristal-liquides sont ainsi observées avec des structures et des défauts proches de ceux des cristaux liquides thermotropes (voir glossaire). On trouve également des phases plus exotiques comme la « phase éponge », *L3*, isotrope à grande échelle mais localement constituée de membranes. Cette phase diffère de la phase lamellaire *Lα* voisine seulement par la topologie des membranes (fig. 4) et par son caractère isotrope. Ceci confère à l'interface *Lα*/*L3* des propriétés remarquables (voir thèse de Christophe Blanc). La continuité des bicouches, malgré leur changement de topologie, conduit ainsi à une véritable épitaxie (fig. 4) entre ces

phases structurellement très proches, mais non cristallines. Pour la même raison la transition de la phase éponge vers la phase lamellaire est forcée très facilement sous écoulement (voir thèse de Hasna Fates Mahjoub).

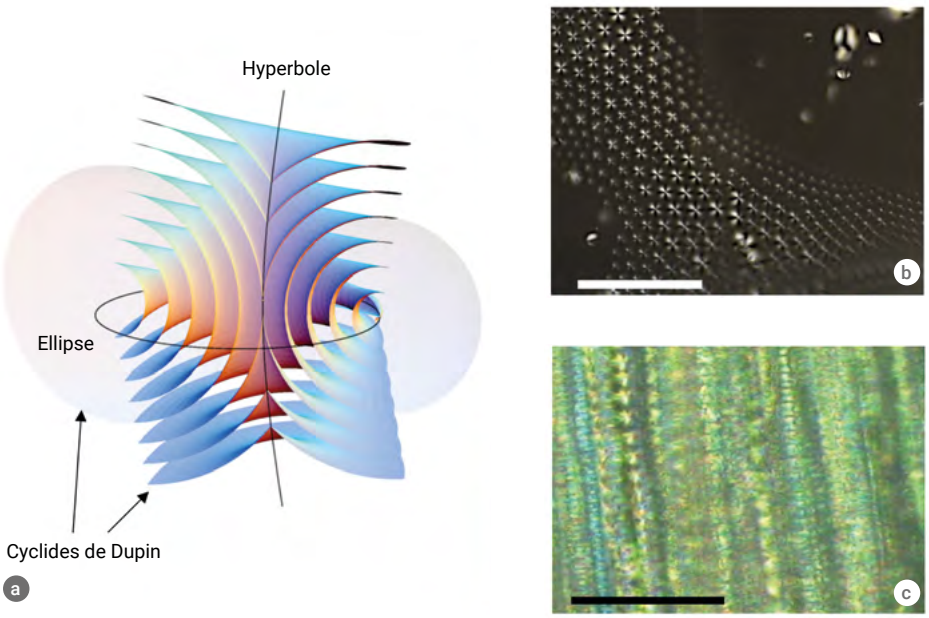
Les phases lamellaires présentent non seulement des défauts microscopiques (dislocations coin et vis reliées à la périodicité lamellaire), mais aussi des défauts macroscopiques, visibles optiquement et liées aux déformations de courbure des couches, les « coniques focales » (fig. 5). Celles-ci sont constituées d'une ellipse et d'une hyperbole confocales, c'est-à-dire que le foyer de l'ellipse est confondu avec le sommet de l'hyperbole et le sommet de l'ellipse est confondu avec le foyer de l'hyperbole. Au voisinage de ces lignes singulières, les couches prennent la forme de *cyclides* de Dupin, illustrées sur la figure 5a, qui respectent la périodicité lamellaire. Ces arrangements fascinaient Maurice Kleman, tout comme le fait que c'est par la seule observation de ces lignes en microscopie optique (et une bonne connaissance géométrique !) que Georges Friedel détermina la nature lamellaire de certains cristaux liquides au début du XX^{e} siècle. Les coniques focales sont visibles en microscopie optique et elles apparaissent assez systématiquement dans les phases lamellaires dès que des contraintes aux interfaces (fig. 5b) ou des cisaillements (fig. 5c) sont présents.

De faibles déformations de phases lamellaires peuvent conserver l'alignement des couches en privilégiant le mouvement simple de dislocations. Avec Claire Meyer, Maurice Kleman a montré que les différentes phases lamellaires partagent les mêmes propriétés rhéologiques. Le taux de cisaillement $\dot{\gamma}$ varie ainsi avec la contrainte σ selon une loi de puissance $\dot{\gamma} = A(T)\sigma^m$ avec un exposant $m \approx 1{,}67$. Un modèle, basé sur la théorie du fluage à haute température dans les alliages et les métaux, permet de reproduire l'exposant macroscopique observé ($m = 5/3$) et les valeurs de $A(T)$. Sous un cisaillement donné, le glissement de dislocations vis compense plastiquement la contrainte et stabilise les couches. Le glissement des couches les unes sur les autres est ainsi facilité. Ces propriétés rhéologiques sont universelles car liées uniquement à la structure en couches et aux défauts topologiques associés.

>>>



4. Les molécules amphiphiles possèdent des parties hydrophiles et lipophiles. Dans un solvant comme l'eau, elles s'associent spontanément, donnant naissance à des structures très diverses, dont les membranes constituées de bicouches moléculaires représentées ici. La phase lamellaire *Lα* est un empilement périodique de membranes de symétrie uniaxiale, tandis que la phase éponge *L3* est un réseau aléatoire et isotrope de membranes connectées. Leurs topologies sont différentes, mais les bicouches évoluent sans rupture à travers l'interface *Lα*/*L3* comme montré sur un modèle de cette frontière entre les deux phases. (La période de la phase lamellaire, à gauche, est de 8,3 nm.)



5. Les textures à coniques focales respectent la périodicité des phases lamellaires tout en ne présentant que deux coniques pour singularités (a). Les couches de ces domaines s'appuient sur des surfaces nommées cyclides de Dupin (le tore déformé en montre une complète). Les coniques focales sont visibles en microscopie optique et elles apparaissent assez systématiquement dans les phases lamellaires dès que des contraintes aux interfaces ((b) dans le domaine de coexistence *L3*/*Lα*) ou de forts cisaillements (c), sont présents. Échelles : 200 µm (b) et 100 µm (c). (Voir aussi C. Blanc, M. Kleman, "Curvature walls and focal conic domains in a lyotropic lamellar phase", *The European Physical Journal B* **10** (1999) 53-60 ; C. Meyer, S. Asnacios, M. Kleman, "Universal properties of lamellar systems under weak shear", *The European Physical Journal E* **6** (2001) 245–253.)

>>>

Classification des défauts topologiques en matière condensée

Maurice Kleman était familier des dislocations dans les cristaux (c'est l'ouvrage de Jacques Friedel *Dislocations* (Pergamon Press, 1964) qui lui a servi de manuel). Il connaissait aussi les travaux d'Ernst Feldtkeller, qui avait étudié en 1964 les points singuliers en magnétisme ainsi que les configurations magnétiques stables topologiquement. Dans le domaine des cristaux liquides, les défauts jouent un rôle crucial car ils permettent d'identifier les différentes phases grâce à leurs textures spécifiques observées par microscopie en lumière polarisée. Comment unifier toutes ces descriptions ?

Avec Gérard Toulouse, puis Louis Michel de l'Institut des Hautes Études Scientifiques, Maurice Kleman s'attaque à cette question. La spécificité du matériau et de l'ordre (cristallin, magnétique, moléculaire, etc.) est entièrement décrite par un objet mathématique, l'espace du paramètre d'ordre. Pour un ferromagnétique, le paramètre d'ordre est l'orientation de l'aimantation et cet espace est simple : il s'agit de la sphère unité de l'espace à 3 dimensions. Pour un cristal liquide nématique, l'espace devient plus compliqué : c'est la moitié de la sphère précédente, par exemple l'hémisphère nord, avec identification des points opposés (voir la figure 3b). Cet espace peut devenir extrêmement complexe, difficile à visualiser. Une fois cet espace déterminé, ce qui n'est pas toujours facile, les défauts se décrivent via d'autres objets mathématiques introduits par Henri Poincaré, à savoir ses groupes d'homotopie. Le premier groupe d'homotopie a comme éléments les lacets fermés (donc 1D) tracés sur l'espace du paramètre d'ordre, plus précisément les classes d'équivalence de ces lacets via des déformations continues. Ces déformations continues sont

Dislocation. Une ligne de dislocation est un défaut linéaire dans un cristal, correspondant à une discontinuité du réseau cristallin obtenue par ajout ou soustraction de matière en respectant les translations du réseau, sauf sur la ligne de défaut. Une ligne de dislocation est ainsi caractérisée par sa direction et par son « vecteur de Burgers » (fig. 2d) qui décrit la quantité de matière insérée ou soustraite.

Disinclinaison. La notion de ligne de disinclinaison est obtenue en généralisant celle de ligne de dislocation au cas des milieux non cristallins mais qui possèdent un ordre d'orientation, comme les cristaux liquides. Une ligne de disinclinaison est obtenue par ajout ou soustraction de matière dans un secteur angulaire, tout en respectant l'ordre d'orientation loin de la ligne (fig. 3a).

Cristaux liquides thermotropes et lyotropes. Le vocable, un peu ambigu, « cristal liquide » désigne un état de la matière intermédiaire entre le solide cristallin et le liquide ordinaire. Un échantillon dans un état cristal liquide est anisotrope (c'est-à-dire que ses propriétés dépendent de la direction dans laquelle on l'examine) comme un cristal, mais, à la différence de ce dernier, il peut couler comme un liquide. Ainsi, une substance dans un état cristal liquide est à la fois fluide et anisotrope. Par extension, on appelle aussi cristal liquide toute substance qui présente un tel état fluide anisotrope. De manière un peu schématique, il existe deux manières de « fondre » un cristal : en le chauffant ou en le dissolvant dans un liquide. Dans le premier cas, si l'état cristal liquide est obtenu en chauffant la substance, celle-ci est qualifiée de cristal liquide « thermotrope ». Il s'agit alors le plus souvent de petites molécules organiques de forme anisotrope (allongée ou aplatie). Ce sont ces molécules qui sont couramment utilisées dans les dispositifs électro-optiques d'affichage (écrans à cristaux liquides). Dans le second cas, si l'état cristal liquide est observé lors de la dissolution d'un composé, celui-ci sera qualifié de cristal liquide « lyotrope ». Les cristaux liquides de cette catégorie peuvent aussi être constitués d'entités de forme anisotrope comme des polymères linéaires (tels que l'ADN) ou des agrégats anisotropes de molécules tensioactives (micelles cylindriques ou bicouches membranaires).

Skyrmion magnétique. Configuration magnétique bidimensionnelle (plan (x,y)) se composant par exemple, dans un milieu aimanté selon la direction z, d'un domaine circulaire aimanté selon -z dont la paroi est aimantée dans le plan (x,y), l'aimantation faisant un tour complet le long de cette paroi. Nommé ainsi en l'honneur du physicien Tony Skyrme, qui a proposé en 1962 que les particules élémentaires soient représentées par des configurations topologiquement stables d'un champ.

Hopfion magnétique. Configuration d'aimantation tridimensionnelle se composant par exemple, dans un milieu aimanté dans la direction z, d'un tore d'axe z dont l'intérieur est aimanté dans la direction -z, alors que la surface du tore est aimantée dans le plan (x,y), l'aimantation faisant un tour complet le long de chaque section droite du tore. Nommé en l'honneur du mathématicien Heinz Hopf, qui a décrit en 1931 les applications de la sphère unité S^3 vers la sphère unité S^2 (cette dernière étant la sphère unité familière à nous qui vivons en 3 dimensions).

1• G. Toulouse, M. Kleman, "Principles of a classification of defects in ordered media", *Le Journal de Physique* **37** (1976) L-149.

2• M. Kleman, *Points. Lignes. Parois.*, tomes I et II, Les Éditions de Physique (1977).

3• M. Kleman, O.D. Lavrentovich, *Soft Matter Physics, an Introduction*, Springer New York (2003).

4• M. Kleman, J. Friedel, "Disclinations, dislocations, and continuous defects: A reappraisal", *Reviews of Modern Physics* **1** (2008) 61.

5• M. Kleman, *Chronologie d'un physicien*, Montrouge: Calvage & Mounet (2016).

l'image des déformations continues que l'on ferait subir à l'ordre dans l'échantillon, pour tenter d'éliminer le défaut. Le deuxième groupe d'homotopie fait de même avec des surfaces fermées (donc 2D) équivalentes à notre sphère unité, et ainsi de suite. L'ordre du groupe d'homotopie à considérer dépend juste de la dimension de l'espace de l'échantillon (il peut être un volume, une surface ou un fil) et de celle du défaut à étudier (0 pour un défaut ponctuel, 1 pour une ligne de défauts, etc.). La classification topologique des défauts est ainsi ramenée à la recherche des groupes d'homotopie de l'espace du paramètre d'ordre. Les cas intéressants sont bien entendu ceux où le groupe n'est pas réduit à son élément neutre, c'est-à-dire le circuit contracté à un point. Les mathématiciens ont développé des outils pour calculer ces groupes, la topologie algébrique.

Le magnétisme étant un cas simple, les travaux de Feldtkeller ont été ainsi confirmés, et grandement généralisés. À noter que la topologie des défauts et le sujet des configurations magnétiques topologiquement stables, qui se traitent avec le même formalisme mathématique, sont revenus au grand jour il y a 10 ans environ, avec les études sur les *skyrmions* et *hopfions* magnétiques (voir glossaire), qui correspondent respectivement au deuxième et troisième groupe d'homotopie de la sphère unité dans l'espace à trois dimensions.

La variété des thèmes abordés montre non seulement que l'héritage scientifique de Maurice Kleman est considérable mais aussi qu'il est toujours d'une extrême actualité. Ceci est illustré entre autres par le regain d'intérêt actuel autour des skyrmions magnétiques ainsi que par l'activité toujours intense dans le domaine des cristaux liquides autour des défauts. En effet, actuellement, on organise les défauts, on les manipule, on les utilise pour confiner et assembler des nanoparticules, on les utilise pour mieux contrôler la lumière, on crée des skyrmions avec des cristaux liquides chiraux, etc… Les perspectives ouvertes par les travaux de Maurice Kleman sont très loin d'avoir été entièrement explorées. ▮