

# Recherches sur les textures des états mésomorphes - 2. -Les champs polygonaux dans les cholestériques Y. Bouligand

### ► To cite this version:

Y. Bouligand. Recherches sur les textures des états mésomorphes - 2. - Les champs polygonaux dans les cholestériques. Journal de Physique, 1972, 33 (7), pp.715-736. 10.1051/jphys:01972003307071500 . jpa-00207299

## HAL Id: jpa-00207299 https://hal.science/jpa-00207299

Submitted on 4 Feb 2008

**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.

### **RECHERCHES SUR LES TEXTURES DES ÉTATS MÉSOMORPHES** 2. — LES CHAMPS POLYGONAUX DANS LES CHOLESTÉRIQUES

#### Y. BOULIGAND

Laboratoire de Zoologie de l'Ecole Normale Supérieure, 46, rue d'Ulm, Paris (Ve)

(Reçu le 4 avril 1972)

**Résumé.** — Des textures polygonales ont été examinées en microscopie à contraste de phase et entre polaroïdes croisés, avec des mélanges de MBBA (nématique à la température ordinaire) et de petites quantités de benzoate de cholestérol ou de baume de Canada. La mésophase cholestérique ainsi obtenue est arrangée selon un ensemble de domaines qui ne sont pas exactement focaux. Leurs règles d'association diffèrent fondamentalement de celles connues classiquement dans les smectiques. Les courbes focales appartiennent généralement à plusieurs domaines imparfaits et peuvent être des coniques (segments d'hyperbole), mais ne sont pas associées de manière biunivoque en position focale. Les domaines rentrent en contact selon des surfaces coniques qui ne sont pas de révolution, en général.

Des dislocations de rotation  $(+\pi \text{ et} - \pi)$  et des dislocations-coins interviennent dans certains polygones ainsi que dans les régions qui limitent les champs polygonaux. Dans certains cas, les dislocations de rotation sont en même temps des segments focaux et introduisent de fortes variations du pas cholestérique. Le pas hélicoïdal présente également un maximum relatif au niveau des courbes focales classiques.

On peut démontrer dans quelques cas assez exceptionnels l'existence d'une dislocation-vis superposée à un segment focal. Cependant, les préparations ne permettent pas de mettre en évidence un grand nombre de dislocations-vis affectant la périodicité cholestérique, bien que leur présence puisse paraître nécessaire. La distribution des axes cholestériques selon des segments rectilignes, tendus entre des courbes focales qui ne sont pas des coniques focales, est solénoïdale et conduit à des dislocations-vis. En fait, les enveloppes des axes cholestériques ne sont pas exactement rectilignes et sont même fortement recourbées au voisinage des lignes focales et des divers types de dislocations.

L'orientation des doubles spirales très visibles dans les polygones est liée à la chiralité de la mésophase cholestérique. De nombreux détails morphologiques ont été élucidés. Des ramifications des côtés des polygones sont fréquentes et ne sont pas compatibles avec leur forme rigoureusement hyperbolique. Ce fait implique également des variations locales du pas cholestérique. Les côtés des polygones peuvent être également interrompus par des petits quadrilatères montrant une dissymétrie liée au caractère hélicoïdal de la mésophase. Plusieurs sortes de fissures ou de champs polygonaux dissociés ont été analysés (fissures avec ou sans chevrons, avec ou sans dislocations de rotation). Dans de nombreux cas, l'interprétation en termes de domaines n'est pas évidente.

Abstract. — Polygonal textures have been examined with the ordinary polarizing microscope and the phase-contrast microscope in mixtures of MBBA (nematic at the room temperature) with small amounts of cholesterol benzoate or Canada balsam. The cholesteric mesophase is arranged in a set of domains which are not exactly focal. The rules of their association differ fundamentally from those classicaly known for smectics. The focal curves belong generally to several imperfect domains and can be conics (Hyperbola segments), but are not reciproquely associated in focal position. The domains enter in contact along conical surfaces, which are not generally of revolution.

Rotation-dislocations  $(+\pi \text{ and } -\pi)$  and edge-dislocations occur in certain polygons and at the boundaries of the polygonal fields. In some cases, rotation-dislocations are also focal segments and introduce strong variations of the cholesteric pitch. But there is also a relative maximum of the helical pitch at the level of the classical focal curves.

One can see occasionally the presence of a screw-dislocation superimposed on a focal segment. However, there is no evidence of a number of screw-dislocations through the cholesteric periodicity, though their presence could appear necessary. The distribution of the cholesteric axis along straight segments, stretched between focal curves, which are not focal conics, is solenoïdal and leads to screw-dislocations. In fact, the envelopes of cholesteric-axis are not exactly straight segments and are strongly curved in the vicinity of the focal lines and the edge-dislocations.

The orientation of the double spirals clearly visible in the polygons is related to the chirality of the cholesteric mesophase.

Many morphological details have been worked out. Bifurcations of polygon sides are frequent and are not compatible with the hyperbolic shape. This fact involves also a local variation of the helical pitch. The polygon sides can be interrupted by small quadrilaterals showing a dissymetry related to the helical character of the mesophase. Several kinds of splits or dissociated polygon fields have been analysed (splits with or without chevrons, and with or without rotation-dislocations). In many cases, the interpretation in terms of domain arrangement is not obvious. Introduction. — Les mésophases cholestériques présentent parfois des textures qui rappellent celles décrites avec une grande précision dans les corps smectiques. Ces derniers peuvent former des champs polygonaux dans lesquels les domaines focaux sont arrangés selon certaines règles revues dans l'article précédent. Les mésophases cholestériques que nous avons examinées s'ordonnent également selon des systèmes de champs polygonaux, eux-mêmes divisés en domaines, arrangés cependant suivant des règles d'association différentes de celles des coniques focales. Ce sont de telles textures que nous allons décrire et discuter.

Nous avons publié récemment des micrographies démontrant l'existence de dislocations de rotation intéressant la périodicité cholestérique [1]. Nous donnons, figure 1, les schémas qui s'y rapportent. Les



FIG. 1. — Disinclinaisons  $\tau$  et  $\lambda$  dans un cholestérique et leur association par paires. Une dislocation de rotation  $\pm \pi$  intéresse la périodicité cholestérique. Les traits continus représentent le lieu des points dans le plan d'observation, où les molécules lui sont parallèles. Les points correspondent aux molécules perpendiculaires au plan de la feuille. Les clous représentent des molécules obliques en projection, la pointe correspondant à l'extrémité tournée vers l'observateur. Les dislocations  $\lambda$  ne présentent pas de discontinuité des orientations moléculaires contrairement aux dislocations. *a*, *b*, *c*, *d* : disinclinaisons  $\tau$  et  $\lambda$  isolées ; *e*, *f*, *g*, *h*, *i* : appariement sous forme de dislocations-coins (p = pas cholestérique ; d = distance des deux dislocations d'une même paire).

dislocations-coins également très visibles dans ces documents résultent de l'association par paires de dislocations de rotation de signes opposés [2]. Nous montrerons enfin l'existence de dislocations-vis dans un prochain travail. Certaines dislocations de rotation apparaissent dans les champs polygonaux et déterminent des régions qui échappent à la division en domaines focaux.

Les cristaux liquides cholestériques peuvent s'agencer selon des textures souvent complexes et fort différentes. Nous distinguerons : la texture à plans, où les couches sont subhorizontales et les « plages à éventails » où il y a au contraire tendance à la verticalité, l'arrangement se faisant autour de dislocations de rotation. Les réseaux de polygones se situent un peu entre ces deux types d'organisation. Ils présentent parfois une grande régularité géométrique, ce qui en facilite l'étude. C'est donc par eux que nous commencerons l'exposé des résultats. Les textures à plans et les plages à éventails seront décrites dans les publications ultérieures de cette série.

Matériel. — Le p-méthoxy-benzylidène, p-n-butylaniline (MBBA) est nématique à la température ordinaire. Le paraazoxyanisol (PAA) est nématique entre 116 et 133 °C. Une torsion cholestérique peut être obtenue en additionnant du benzoate de cholestérol (BCh) ou du baume de Canada (X). Le premier composé (BCh) est cholestérique entre 145° et 178 °C. Le baume de Canada est isotrope à l'état pur et intervient d'une manière comparable à la colophane utilisée autrefois par Friedel (1923). Ces substances extraites de résines végétales renferment des espèces chimiques douées d'un pouvoir rotatoire moléculaire et permettent en solution dans un corps nématique d'induire une torsion cholestérique. Les observations ont porté sur des préparations ordinaires entre lame et lamelle lavées par le mélange sulfochromique, rincées dans l'eau distillée et séchées (parfois à l'air comprimé) d'autres lames ont été simplement lavées à l'eau courante et séchées. L'examen et les micrographies ont été réalisés avec un photomicroscope Zeiss muni d'un polariseur et d'un analyseur.

Observations. -- Les textures les mieux définies géométriquement ont été obtenues avec le mélange MBBA + baume de Canada. Ces préparations donnent les images les plus spectaculaires et nous les étudierons pour commencer. Nous avons toujours utilisé une quantité suffisante de baume pour être au voisinage de la transition mésophase-liquide isotrope. Un excès de baume ferait disparaître complètement la phase biréfringente. Les petites quantités de matériel utilisé ne permettent pas de préciser les concentrations respectives des constituants. L'épaisseur de la lame cristalline liquide peut varier de 2 à 20  $\mu$ . Le demi-pas cholestérique observé est généralement compris entre 1 et 10 µ et est donc parfaitement résolu dans nos préparations. Celles-ci présentent une bonne homogénéité et se prêtent à des mesures précises.

Le demi-pas cholestérique doit être mesuré dans les régions où la stratification cholestérique est vue de profil (l'axe cholestérique étant perpendiculaire à l'axe optique de l'appareil).

La stratification est alors immobile lorsqu'on change la mise au point et la périodicité y est minimum. Lorsque l'arrangement cholestérique est oblique, les striations apparaissent avec une période supérieure au demipas et un changement de mise au point provoque leur décalement. Quand un objet est finement strié, il existe plusieurs mises au point apparentes situées de part et d'autre de la mise au point exacte. Ce phénomène entrave quelquefois l'observation du décalement des strates obliques.

Les arrangements que nous avons analysés peuvent apparaître par refroidissement d'une lame préalablement chauffée et donc isotrope. Les sphérulites de germination fusionnent et la texture de la mésophase évolue pendant quelques minutes. Il se peut qu'une très fine pellicule de liquide isotrope sépare la surface du verre et la mésophase dans certaines préparations (Fig. 2).



FIG. 2. — Relations entre la mésophase cholestérique et le liquide isotrope entre lame et lamelle; L : lame; l : lamelle; g : sphérulite de germination; i : liquide isotrope; m : mésophase; A et A' : limites de la lame isotrope séparant la mésophase du verre.

Les couleurs observées entre nicols croisés démontrent souvent une forte diminution de la biréfringence au voisinage du liquide isotrope, et celle-ci paraît devoir être attribuée à l'amincissement de la mésophase (Fig. 2). Le PAA + BCh présente parfois entre lame et lamelle une frontière qui suit parallèlement le bord de la mésophase. Ainsi se trouvent séparées une zone interne caractérisée par une biréfringence moyenne constante et une zone externe où les couleurs de polarisation deviennent plus franches (du 2<sup>e</sup> et du 1<sup>er</sup> ordre) au fur et à mesure qu'on se rapproche du bord. Les points A et A' de la figure 2 pourraient éventuellement représenter cette frontière en section. Nous ne l'avons jamais observée dans les mélanges constitués à partir de MBBA.

a) ASPECT GÉNÉRAL DES POLYGONES. — Les phases stabilisées sont souvent caractérisées par un découpage polygonal en domaines. Cette organisation est complètement détruite par un déplacement assez important de la lamelle, mais elle peut se reconstituer avec des dessins différents, au bout de quelques minutes. Les polygones sont limités par des segments généralement curvilignes. Ce caractère est souligné parfois par la présence de polygones à deux côtés seulement. On observe un premier pavage de polygones contigus en mettant au point sur la lamelle et un second, différent, mais non indépendant au niveau de la lame (Fig. 3a, b).

b) ARRANGEMENT DES STRATES. — Chaque polygone présente un centre autour duquel les couches cholestériques sont déposées selon des doubles spirales bien visibles en lumière naturelle (Fig. 3a, b), ou en contraste de phase (Fig. 4a, b). La striation cholestérique forme également des spirales autour des sommets des polygones, mais le parcours d'une ligne prise séparément y présente des points anguleux. Le lieu de ces derniers correspond au contour des différents polygones (Fig. 3a, b). Vues en lumière naturelle ou en contraste de phase, dans un même réseau, les spirales qui entourent les sommets des polygones sont doubles et en sens inverse de celles qui caractérisent leurs centres (Fig. 3a, b, 4a, b). Dans chaque réseau coexistent par conséquent deux types de spirales : les unes centrées dans les polygones sont rondes et ne présentent aucun point anguleux ; les autres centrées sur les sommets des polygones ont un contour anguleux et seront dites polygonales.

Entre polaroïdes croisés, les doubles spirales rondes et polygonales sont bien visibles au niveau de la lamelle (Fig. 40). Les courbes observées en mettant au point sur la lame sont moins nettes en général. Il est même souvent difficile de préciser si l'on a des courbes fermées ou des spirales d'autant plus qu'un système de croix noires peut se superposer à la striation cholestérique. Dans bien des cas, les branches sombres sont plus marquées au niveau de la lame (Fig. 4d). Lorsque les polygones deviennent relativement petits dans les préparations peu épaisses, on observe plutôt des courbes fermées, aussi bien au niveau lame et lamelle.

Les spirales polygonales ne présentent pas de point authentiquement anguleux; ce serait incompatible avec la structure cholestérique. Il suffira de noter que les angles sont « arrondis » (Fig. 4*a*, flèche).

Les courbes spiralées qui entourent les centres ou les sommets des polygones sont de type parallèle et la distance qui sépare l'une de la suivante est exactement égale au demi-pas cholestérique. L'extrême régularité de ces courbes et de leur parallélisme nous permet d'affirmer que la périodicité cholestérique est vue de profil au proche voisinage des lame et lamelle (Fig. 3a, b). Il peut y avoir cependant des exceptions pour les quatre ou cinq premières strates autour d'un centre ou d'un sommet de polygone, la striation étant alors plus large et les strates vues obliquement (Fig. 15). Les zones médianes des côtés des polygones sont caractérisées très généralement par un plus fort écartement des lignes périodiques (Fig. 4, 5). Il est probable que cette disposition corresponde à un pas cholestérique localement plus élevé (lié à un maximum de



FIG. 3a.

FIG. 3b.



FIG. 3c.

FIG. 3. — Champs polygonaux : MBBA et baume de Canada, lumière naturelle. Figure a: mise au point au niveau lamelle ; Figure b: mise au point au niveau lame dans la même région de la préparation ; Figure c: mise au point entre lame et lamelle en diaphragmant fortement. Les deux réseaux conjugués sont visibles simultanément. 2 : Dislocation-coin traversant l'épaisseur de la préparation ;  $\alpha$  : quadrilatères de jonction affectant deux côtés conjugués ;  $\beta$  : quadrilatère de jonction affectant le niveau lame et absence de quadrilatère sur le côté conjugué ;  $\gamma$  : dislocation-coin courant dans l'épaisseur de la préparation.



FIG. 4a.



FIG. 4b.



FIG. 4c.



FIG. 4d.

FIG. 4. — Champs polygonaux : MBBA et baume de Canada ; a et b : contraste de phase ; c et d : polaroïdes croisés parallèles aux côtés de la figure ; a et b de même que c et d correspondent à une même région d'une préparation mise au point successivement au niveau lamelle, puis au niveau lame; 1 : spirale d'ordre élevé; 3 : spirale à centre disjoint; 4 : bifurcation d'un côté de polygone; x, y : fragments d'un même côté de polygone qui ne sont pas exactement en prolongement l'un de l'autre; flèche : les angles des spirales polygonales sont arrondis.

courbure des couches), mais au fait également que les strates ne sont pas exactement verticales dans cette région.



FIG. 5a.



FIG. 5b.

FIG. 5. — MBBA et benzoate de cholestérol ; lumière naturelle ; champs polygonaux subquadratiques. Mises au point au niveau lamelle (a) et lame (b) dans la même région.

c) RELATIONS DE CONJUGAISON. — Les sommets de l'un des réseaux de polygones sont situés sur les verticales des centres de l'autre. Reprenant une terminologie adoptée par Friedel et Grandjean [4], nous dirons que les deux réseaux sont conjugués. Les spirales doubles avec ou sans point anguleux, observées aux niveaux de la lame ou de la lamelle sont de même sens. Rappelons qu'une spirale est dextre, quand le point courant s'éloignant du centre, le rayon vecteur tourne dans le sens inverse des aiguilles d'une montre. Dans le cas du MBBA additionné de baume de Canada (Fig. 3), les spirales du niveau lamelle sont dextres pour les centres des polygones et sénestres pour les sommets. C'est l'inverse pour le niveau lame (centres sénestres et sommets dextres) (Fig. 5). Le BCh a un effet opposé.

Ces polygones sont à deux, trois, quatre, cinq, six ou sept côtés curvilignes. Chaque côté est un segment d'hyperbole et appartient à deux polygones contigus dont les centres sont les foyers. On vérifie aisément qu'il s'agit de branches d'hyperbole parce que la différence des distances aux deux foyers est constante en chaque point. Les lignes sombres qui soulignent la périodicité cholestérique ne sont pas interrompues au niveau des segments curvilignes, mais y changent de direction. Quand on passe d'une ligne à la suivante, les deux distances aux deux foyers augmentent ou diminuent simultanément d'un demi-pas cholestérique et leur différence n'est donc pas changée.

Les relations de conjugaison apparaissent clairement en mettant au point entre la lame et la lamelle et en diaphragmant beaucoup. Les deux réseaux sont visibles simultanément (Fig. 3c). Le réseau du niveau porte-objet apparaît en clair et le réseau supérieur se détache en sombre. On obtient des moires entre les arrangements périodiques des deux niveaux.

La relation de conjugaison qui existe entre les deux réseaux entraîne certaines propriétés qui sont aisément vérifiées. Les deux réseaux présentent le même nombre de côtés. En effet, à chaque côté d'un réseau correspond un couple de polygones contigus dont les centres sont à la verticale des extrémités d'un côté de l'autre réseau. Il y a donc une correspondance biunivoque entre les côtés des deux réseaux en regard.

Soit AB un côté de polygone, branche d'hyperbole de foyers  $F_1$  et  $F_2$ , centres des polygones adjacents. On a :  $AF_1 - AF_2 = BF_1 - BF_2$  (1), ce qui s'écrit également :  $F_1 A - F_1 B = F_2 A - F_2 B$  (2). Les points  $F_1$  et  $F_2$  sont donc sur une même branche d'hyperbole de foyers A et B. Cette branche est parallèle et à la verticale de celle qui définit le côté conjugué (Fig. 6).



De même, on voit immédiatement qu'il y a autant de sommets dans un réseau qu'il y a de polygones dans l'autre. Il faut noter, cependant, que les nombres des sommets des deux réseaux peuvent être différents. Il en est donc de même pour les nombres des polygones. On remarquera enfin que, du sommet conjugué du centre d'un polygone de n côtés, partent les n côtés conjugués, séparant n polygones distincts et contigus. Nous appellerons segments focaux les côtés des réseaux et l'ensemble des segments verticaux qui relient les sommets des polygones aux centres du système conjugué.

Lorsqu'on change la mise au point entre la lame et la lamelle, les figures spiralées paraissent s'agrandir ou diminuer de diamètre du fait d'une certaine obliquité des axes cholestériques dans les niveaux intermédiaires de la préparation. Partant du niveau de la lamelle, une double spirale ronde au centre d'un polygone est d'abord stationnaire, puis paraît grandir, alors que les doubles spirales polygonales centrées sur les sommets diminuent de diamètre. Une spirale ronde prend progressivement une forme polygonale et inversement, lorsque la mise au point balaye l'épaisseur de la préparation. Arrivé au niveau de la lame, si l'on change progressivement la mise au point vers la lamelle, on observe après une courte phase stationnaire les spirales rondes qui paraissent grandir et les polygonales diminuer en diamètre.

Les spirales ne sont pas toujours doubles ; elles peuvent être par exception triples, quadruples ou d'ordre plus élevé (1 dans Fig. 4a, b et dans Fig. 15c, d). Deux spirales conjuguées (ronde et polygonale) sont toujours de même ordre. Certaines dislocations-coins (2 dans Fig. 3a, b et 15c, d) peuvent s'introduire dans les spirales en modifiant leur ordre à une certaine distance de leur centre. Les dislocations de cette nature peuvent se retrouver dans le réseau conjugué. On observe çà et là de longs fils sinueux, mis au point entre lame et lamelle et limités par deux extrémités qui correspondent à l'insertion d'une strate dans les spirales des réseaux. Il s'agit de dislocations-coins vues en élévation (Fig. 3c). Nous verrons dans un prochain travail que certaines dislocations-vis se superposent aux segments focaux verticaux, mais elles ne sont pas nombreuses.

Certains polygones ont leur centre disjoint en deux points A et B. Dans ce cas, les strates s'enroulent autour du segment AB (3 dans les Fig. 4 et 15). Celui-ci se transforme par changement de la mise au point en un segment A' B' plus grand du réseau conjugué. A' B' est plus long que AB et, par conséquent, ni A' ni B' ne se trouvent exactement à la verticale de A et B. Une spirale polygonale s'enroule autour de A' B' et ces deux points sont les sommets de deux polygones distincts.

On rencontre assez souvent une situation un peu plus compliquée, résumée sur la figure 7. Une spirale



FIG. 7.

polygonale à centre dédoublé est traversée par un côté de polygone (cf. 3 dans Fig. 4c).

Certains sommets de polygone ne présentent aucune formation spirale, mais ils sont assez exceptionnels; tout se passe comme si une branche d'hyperbole se ramifiait en deux autres branches (4 dans Fig. 4*a*, *b*). Cette dichotomie intervient surtout lorsque deux segments successifs d'un polygone forment un angle presque plat; les deux côtés conjugués fusionnent avant de concourir au centre.

d) QUADRILATÈRES DE JONCTION. — Le côté commun à deux polygones peut être interrompu par un petit losange correspondant à un réarrangement des strates. On comprend aisément l'origine d'une telle disposition avec les figures 8 et 9. Lorsqu'un segment d'hyperbole





est continu, la région proche de l'axe des foyers représente le lieu des points où les strates subissent le plus fort rebroussement. La présence d'un quadrilatère (Fig. 9) substitue dans une même strate deux points anguleux obtus à un seul extrêmement aigu (Fig. 8). Ces quadrilatères sont le plus souvent des losanges (Fig. 3a, b).

Une observation attentive des micrographies montre que la figure 9 n'est pas tout à fait exacte. La figure 10 correspond mieux à la réalité : il existe toujours un



Fig. 10. — La strate  $a\alpha\beta b$  est symétrique par rapport au centre du quadrilatère.

niveau de la striation cholestérique qui traverse le quadrilatère de manière symétrique par rapport à son centre (strate  $\alpha\beta$  sur la Fig. 10). Les deux dislocations de rotation situées en  $\alpha$  et  $\beta$  sont décalées d'un demipas cholestérique de part et d'autre de AB. Le décalage se fait toujours selon la même orientation au niveau lame et en sens inverse au niveau lamelle. Le schéma de la figure 10 correspond aux quadrilatères obtenus avec le MBBA additionné de benzoate de cholestérol au niveau lame, ou de baume de Canada au niveau lamelle. Ainsi les quadrilatères de jonction sont en général des parallélogrammes dont les côtés sont presque égaux, à un demi-pas cholestérique près. Ces parallélogrammes ne sont pas toujours parfaits. Ils peuvent être affectés par certaines dislocations de translation de la périodicité cholestérique. En outre, l'angle au sommet A peut être plus aigu que l'angle en B et les côtés A $\alpha$  et A $\beta$  sont alors plus longs que les côtés  $B\alpha$  et  $B\beta$ .

Deux côtés conjugués des deux réseaux en regard peuvent être entiers (Fig. 5) ou tous les deux interrompus par un parallélogramme (Fig.  $3a, b, \alpha$ ) ou seulement l'un d'entre eux (Fig.  $3a, b, \beta$ ).

Les deux segments d'un même côté de polygone, situés de part et d'autre d'un quadrilatère de jonction, n'appartiennent pas exactement à la même branche d'hyperbole. Ils font partie de deux hyperboles homofocales voisines, mais la différence des distances aux foyers qui les caractérise change d'un demi-pas cholestérique de part et d'autre du quadrilatère. On observe d'ailleurs aisément que les deux segments qui entourent un parallélogramme ne sont pas exactement en prolongement l'un de l'autre (Fig. 4c, x, y).

Les parallélogrammes et les divers quadrilatères ne sont pas les seuls réarrangements possibles des strates entre deux polygones contigus. Il existe d'autres systèmes pouvant comporter des microspirales.

e) RÉSEAUX PRESQUE QUADRATIQUES. — Les polygones sont souvent des carrés à peu près parfaits (Fig. 5). Les deux réseaux conjugués sont alors de type quadratique. La régularité des systèmes obtenus est parfois remarquable. Les branches d'hyperbole se confondent avec des segments de droite puisqu'elles sont situées à égale distance des foyers.

On se rend compte parfaitement avec de tels exemples que les côtés des polygones et les segments verticaux, reliant les sommets et les centres des systèmes conjugués représentent le lieu des points où les strates passent par un maximum relatif de courbure. Nous appellerons lignes, courbes ou segments *focaux* ces éléments de la texture. Les strates sont disposées selon des cônes de révolution autour de ces courbes, mais les sommets de ces derniers sont légèrement arrondis. Pour les courbes focales qui se trouvent au contact des lame et lamelle, ces cônes sont limités par deux génératrices horizontales diamétralement opposées (Fig. 11).



FIG. 11. — Disposition relative des couches cholestériques au niveau de deux côtés conjugués. l : limite lamelle-mésophase ; L : niveau lame ; doubles flèches : côtés polygonaux conjugués.

f) ZONES DE DISSOCIATION DES POLYGONES. — Les champs polygonaux des mésophases cholestériques se trouvent situés généralement entre des textures de natures bien différentes. La zone de séparation n'est

pas franche puisqu'il n'y a pas de changement de phase. Les zones intermédiaires comportent souvent des sortes de fissures qui pénètrent plus ou moins profondément les champs polygonaux. Elles peuvent être de deux natures. La striation peut y former des chevrons ou bien donner des plages uniformes qui se raccordent aux champs polygonaux au niveau de dislocations de rotation.

 $\alpha$ ) Chevrons. — Les strates cholestériques présentent un arrangement ondulé dont les caractéristiques sont les suivantes. On peut distinguer aux niveaux lame et lamelle un ensemble de lignes qui alternent : soit 1, 2, 3, 4, 5, etc... de telles lignes (peu incurvées en général) au niveau lamelle et 1', 2', 3', 4', 5', etc..., les lignes alternantes du niveau lame. Toutes ces lignes ont une valeur focale, c'est-à-dire que les strates y présentent un fort maximum de courbure (Fig. 12). Les



FIG. 12. Arrangement en chevrons ; traits pleins : observations au niveau lamelle ; traits interrompus : niveau lame. Les lignes courbes correspondent au dessin des strates. Les droites 1, 2, 3, 4, 5, ... correspondent à des maximums élevés de courbure au niveau lamelle ; 1', 2', 3', 4', 5', ... maximums de courbure au niveau lame.

strates ont l'aspect de sinusoïdes dont les maxima ont un rayon de courbure supérieur à celui des minima au niveau lamelle par exemple. C'est alors l'inverse qui se produit en mettant au point au niveau lame. Lorsqu'on change progressivement la focalisation de la lamelle vers la lame, les sommets à grands rayons de courbure dérivent selon une orientation opposée à la concavité, en même temps qu'augmente la courbure. Les couches sont donc obliques. Les dispositions en chevrons peuvent apparaître très clairement dans les réseaux quadratiques quand une série de carrés est modifiée en rectangles très allongés (Fig. 13). Ce cas particulier ne constitue pas cependant la seule origine des chevrons. Quand ces formations deviennent importantes, elles apparaissent comme de véritables fissures au sein des champs polygonaux et la direction moyenne des strates est parallèle à l'allongement des fissures.



FIG. 13. — Système de polygones rectangulaires conjugués, introduisant des chevrons dans la bande Ch. Traits pleins côté lamelle et interrompus côté lame.

Il existe un deuxième type de chevrons indéfinis, indépendant des systèmes polygonaux qui constitue une illustration d'un arrangement selon des Cyclides de Dupin, vu dans la précédente note et que nous analyserons dans un travail ultérieur pour les cholestériques.

 $\beta$ ) Fissures avec dislocations de rotation. — La direction générale des strates est perpendiculaire à l'allongement des fissures. La stratification peut y être très régulière (Fig. 14a, b, c). Nous avons vu plus haut que le centre d'enroulement spiral d'un polygone pouvait être remplacé par deux centres d'enroulement parabolique de la stratification cholestérique. Si la même situation intervient pour une série de polygones contigus, on voit apparaître des fissures qui peuvent être réduites (Fig. 14a, b) ou prendre une plus grande extension (Fig. 14c). Dans certains cas, deux dislocations de rotation en regard sont réunies par des strates fortement soulignées et verticales (1 dans Fig. 14c). On peut observer, par ailleurs, que deux dislocations voisines d'un même côté de la fissure peuvent être réunies par une zone de renversement de l'inclinaison des strates (2 dans Fig. 14a, b).

 $\gamma$ ) Systèmes polygonaux imparfaits. — Nous avons déjà signalé un certain nombre de défauts : spirales d'ordres différents de deux, dislocations-coins modifiant l'ordre des spirales à une certaine distance du centre. On peut observer également des fils sinueux (Fig. 3c,  $\gamma$ ) qui naissent à partir de telles dislocationscoins pour disparaître plus loin au niveau d'une autre. Ces dislocations peuvent être observées en élévation (en donnant ces fils sinueux) ou de bout, parallèlement à l'axe optique. Nous savons également



FIG. 14a.

FIG. 14b.



FIG. 14c.

FIG. 14. — MBBA + baume de Canada ; polaroïdes croisés parallèles aux côtés de la figure. Champs polygonaux ouverts par des fissures bordées par des dislocations de rotation ; a et b : observation aux niveaux lamelle et lame d'une petite fissure correspondant à deux polygones contigus à centres dédoublés ; c : fissure plus importante ; 1 = strates fortement soulignées ; 2 : renversement de l'inclinaison des strates.

**№** 7





FIG. 15a.

FIG. 15b.



FIG. 15c.



FIG. 15d.

FIG. 15. — Défauts des champs polygonaux. MBBA + baume de Canada. *a* et *b* : examen aux niveaux lame et lamelle entre polaroïdes croisés, les spirales sont plus serrées en *a* qu'en *b*; *c* et *d* : examen aux niveau lame et lamelle en lumière naturelle d'un système polygonal où les spirales rondes et polygonales sont peu différenciées; 1 : spirale d'ordre huit; 2 : dislocation-coin; 3 : polygone à centre dédoublé.

LE JOURNAL DE PHYSIQUE. - T. 33, Nº 7, JUILLET 1972.

que les centres des polygones peuvent être dédoublés et les champs polygonaux fissurés.

Un autre genre de défaut apparaît quand l'influence de la lame est différente de celle de la lamelle. La figure 14*a*, *b* nous donne un exemple de polygones conjugués, dont les spirales du niveau lamelle sont beaucoup plus serrées que celles du niveau lame. Les strates sont donc obliques au proche voisinage de la lame. Les spirales ou les courbes de type « polygonal » ou « arrondi » se reconnaissent bien.

Certains champs polygonaux donnent des figures qui ne diffèrent que très peu entre les niveaux lame et lamelle. Ce phénomène intervient dans les régions les plus minces des plages polygonales. Le caractère polygonal d'une spirale est simplement un peu plus marqué au niveau lamelle qu'au niveau lame, mais la différence est très faible (Fig. 15c, d).

**Discussion.** -a) DOMAINES FOCAUX IMPARFAITS. -Les systèmes polygonaux que nous avons observés présentent beaucoup de caractères communs avec ceux qui furent décrits par Friedel et Grandjean (1910) dans les smectiques. Les relations de conjugaison sont les mêmes. Cependant les polygones des cholestériques ne renferment pas d'ellipse. Nous avons indiqué dans le précédent travail que les ellipses étaient parfois peu nombreuses ou même absentes dans certains polygones des smectiques. En outre, il peut y exister des domaines définis par des coniques qui ne présentent pas de relation focale.

Il est commode d'introduire la notion de domaine focal imparfait. Un domaine de ce type sera défini par deux courbes C1 et C2 généralement réduites à des segments. Ces courbes peuvent être des coniques, mais ce n'est pas une nécessité et, de toute façon, elles sont rarement en position focale. Dans le cas des smectiques, les molécules représentées par un vecteur n sont alignées sur l'ensemble des segments rectilignes dont les extrémités sont situées sur C1 et C2 ou du moins les portions qui en sont matérialisées. Dans le cas des cholestériques, on aura le même alignement des vecteurs n sensés représenter ici les axes de twist en chaque point (Fig. 16). Appelons rot  $/\!\!/$  n et rot  $\perp$  n les composantes de rot n selon n et normale à n. Pour les deux types de mésophase, on aura toujours dans un domaine : rot  $\perp$  **n** = 0 et rot // **n** sera nul si le domaine est parfait et différent de zéro s'il est imparfait (voir le précédent article de cette série. Les segments C<sub>1</sub> et C<sub>2</sub> seront dits focaux dans les deux cas. En fait, on observe peu de dislocationsvis, mais un certain nombre de dislocations-coins et des variations d'épaisseur du pas cholestérique : ceci indique que l'on a généralement rot //  $\mathbf{n} = 0$  et rot  $\perp \mathbf{n} \neq 0$ . Les lignes de force des axes cholestériques ne sont pas rigoureusement rectilignes.

Nous allons appliquer cette nouvelle conception des domaines aux plus simples des réseaux polygonaux que nous avons étudiés.

b) Exemple des réseaux quadratiques. — Nous



FIG. 16. — a: domaine focal défini par deux segments curvilignes C<sub>1</sub> et C<sub>2</sub>. M<sub>1</sub> et M<sub>2</sub> sont deux points décrivant respectivement C<sub>1</sub> et C<sub>2</sub>. L'axe cholestérique est parallèle à M<sub>1</sub> M<sub>2</sub>, en tout point de ce segment. L'orientation des molécules est représentée au voisinage d'un point de M<sub>1</sub> M<sub>2</sub>. Le cholestérique est supposé senestre. b: orientation des molécules dans un domaine dont les segments focaux L<sub>1</sub> et L<sub>2</sub> sont rectilignes. Les orientations sont représentées dans le plan L<sub>2</sub> M<sub>1</sub> (M<sub>1</sub> étant un point de L<sub>1</sub>), et dans L<sub>1</sub> M<sub>2</sub>. L'ensemble du domaine est couvert par le triangle L<sub>1</sub> M<sub>2</sub> quand M<sub>2</sub> décrit L<sub>2</sub> et réciproquement par L<sub>2</sub> M<sub>1</sub> quand M<sub>1</sub> parcourt L<sub>1</sub>. Les conventions utilisées pour les orientations moléculaires sont rappelées sur la figure 1.

avons rencontré des réseaux presque quadratiques. Nous allons représenter l'organisation d'un réseau qui le serait de manière parfaite. On observe alors au niveau lame un pavage de carrés et au niveau lamelle un quadrillage égal mais décalé par rapport au précédent. Les sommets de l'un occupent en projection les centres de l'autre (Fig. 17*a*). Il suffit de décrire l'arrangement dans une unité que l'on pourra répéter par translation selon les deux directions principales pour couvrir l'ensemble du réseau.

On peut prendre comme unité un parallélépipède ayant pour base l'un des carrés du côté lame et pour arête un segment joignant deux sommets des deux réseaux et séparés par la distance minimum. Soit ABCDA' B' C' D' un tel parallélépipède. A' B' C' D' est au niveau lame et admet pour centre  $\beta'$  à la verticale du sommet B du carré ABCD situé au niveau lamelle. ABCD admet pour centre  $\delta$  qui est à la verticale de D'. On peut décomposer le parallélépipède (Fig. 17b) en deux pyramides à base carrée



FIG. 17.

(A' B' C' D', B) et (ABCD, D') ainsi que deux tétraèdres (A' D' AB) et (C' D' BC). Les descriptions que nous avons données nous apprennent que les segments horizontaux des deux quadrillages (AB, BC, ..., A' B', B' C', ...) ainsi que les segments verticaux  $\beta'$  B et D'  $\delta$  correspondent à des discontinuités ou du moins à de très forts maximums de courbure de la stratification cholestérique. Ceci signifie que de telles lignes ont une valeur focale. La décomposition en domaines portée sur la figure 18 rend compte entièrement de la structure que nous avons décrite. On admet que chaque pyramide à base carrée est formée de quatre domaines imparfaits. Dans (A' B' C' D' B) le segment focal  $\beta'$  B est conjugué des quatre segments A' B', B' C', C' D', D' A'. De même  $D\delta'$  est conjugué de AB, BC, CD, DA. En outre, A' D' est conjugué de AB de même que C' D' l'est de BC. Les deux tétraèdres A' D' AB et C' D' BC ont donc la valeur de domaines. Nous pensons que c'est la seule interprétation possible puisque les axes cholestériques sont bien alignés sur les segments rectilignes qui relient les éléments focaux conjugués.

Il suffit, pour que l'arrangement soit bien compris, d'indiquer l'orientation des axes et des couches cholestériques dans l'un des tétraèdres extraits des deux pyramides et dans l'un des domaines construits sur deux côtés conjugués (Fig. 18). Les autres domaines se déduisent de ceux-là par rotation de  $\pi/2$  autour des axes verticaux  $\beta'$  B ou D'  $\delta$  ou par symétrie par rap-



FIG. 18. — Arrangement des domaines et disposition des couches cholestériques dans un parallélépipède unitaire, extrait d'un réseau quadratique.

port au plan défini par ces deux segments. L'arrangement cholestérique a été représenté dans les domaines (A' B',  $\beta'$  B) et (C' D', BC). La figure 18 permet de comprendre l'origine de l'élargissement ou de la diminution des spirales rondes ou polygonales lorsqu'on change la mise au point.

On peut vérifier que l'orientation des axes cholestériques ne présente pas de discontinuité en dehors des segments focaux. Les orientations sont continues à travers les surfaces séparatrices des domaines aussi bien dans la cellule parallélépipédique qu'entre cellules voisines. Il ne faut pas oublier qu'une certaine densité de dislocations-vis est nécessaire dans chaque domaine, ou bien, on doit admettre qu'il y a des variations du pas cholestérique. Nous avons fait abstraction de ces détails sur une coupe verticale effectuée selon l'une des diagonales du réseau quadratique (Fig. 19*a*).

Une représentation plus exacte est donnée sur la figure 19b. Les couches cholestériques ne forment



FIG. 19. — Disposition des couches cholestériques d'un réseau quadratique coupé verticalement (perpendiculairement aux plans des lame et lamelle) selon la diagonale BD de la figure 17 par exemple. *a* : disposition théorique; *b* : les angles sont « arrondis ».

pas de pointe parfaite au niveau des segments focaux ; elles y présentent un arrondi de courbure élevée. La définition que nous avons donnée plus haut des domaines focaux imparfaits supposait implicitement que la distribution des axes cholestériques était conique et non nécessairement de révolution en tout point d'une ligne focale. Les lignes focales correspondent plutôt au lieu des points par où les couches cholestériques passent par un fort maximum relatif de courbure. L'axe cholestérique est défini en chaque point de cette courbe. Il n'y a pas de distribution conique. On voit alors que, nécessairement, dans le voisinage d'une courbe focale rot  $\perp$  **n** = **b**/*R* (**b** = vecteur binormal unitaire et R = rayon de courbure) ne peut pas être nul. Plutôt que des dislocations-coins, ce sont de fortes variations du pas cholestérique qui sont observées dans ces régions. Les axes cholestériques ne sont donc pas exactement distribués selon des segments de droite tendus entre les courbes focales. Ils tendent à s'aligner dans cette région sur la courbe focale, qui, dans les meilleures conditions, est orientée suivant l'axe du cône de révolution, selon lequel les couches tendent elles-mêmes à se disposer (Fig. 20).



FIG. 20. -a: emboîtement des couches cholestériques au niveau d'une courbe focale; b: disposition correspondante des axes cholestériques dans un plan méridien. La disposition globale dans l'espace est obtenue par rotation de ce plan autour du segment focal.

Il faut noter que les lignes focales sont toujours orientées selon la bissectrice de l'angle apparent présenté par la stratification à son niveau. Nous avons vu dans l'article précédent le sens physique de la loi des cônes correspondants. Il est très probable que cette loi doive être conservée pour les cholestériques, mais sous une nouvelle forme qui pourrait être celle-ci : une mince couche cholestérique traversant une courbe focale est localement de révolution autour du point où elle la coupe et elle y admet un maximum relatif de courbure et de pas hélicoïdal. Il faut remarquer cependant que cette couche ne serait plus de révolution si une dislocation-vis était superposée à la courbe focale. Les cônes correspondant ayant pour sommet un point d'un segment focal et s'appuyant sur la courbe conjuguée ne sont pas de révolution dans les domaines imparfaits. Ceci n'empêche pas les couches cholestériques d'être localement de révolution au niveau où elles traversent la courbe focale.

L'aspect de trois couches cholestériques superposées couvrant plusieurs polygones (supposés tous carrés) est donné figure 21a. Une couche isolée est représentée figure 21b. Il n'est pas toujours possible de représenter une telle couche puisque n.rot n peut être différent de zéro. Nous faisons abstraction des dislocations-vis nécessaires. Cette figure est destinée seulement à rendre compte du sens de l'évasement des couches dans la texture. Les fils sinueux ( $\gamma$ ) qui se superposent au dessin des polygones correspondent à de simples dislocations-coins qui affectent une même couche cholestérique (Fig. 21c). L'arrangement des molécules sur une telle surface peut ne comporter aucune dislocation (Fig. 21d, e) ou bien en présenter çà et là (Fig. 21d, e). Il a été montré dans un travail antérieur (1) que les dislocations de rotation de l'ordre moléculaire dans le plan cholestérique sont équivalentes à grande distance à des dislocations-vis. Nous savons que ces dernières sont nécessaires en général dans les domaines imparfaits.

c) DÉCOMPOSITION EN DOMAINES DES CHAMPS POLY-GONAUX. — D'une manière générale, nous pouvons décrire tous les systèmes conjugués entre lame et lamelle en adoptant les conventions suivantes.

1. — Les polygones de la face supérieure seront représentés en traits pleins et ceux de la face inférieure en traits interrompus. Les segments focaux verticaux par un point épais ou évidé.

2. — Les segments focaux horizontaux de la face supérieure seront notés arbitrairement par un nombre entier 1, 2, 3, ..., n; les segments conjugués horizontaux de la face inférieure seront notés 1', 2', 3', ..., n' de manière que n et n' soient conjugués. Les segments focaux verticaux seront notés a, b, c, ..., m ou a', b', c', m' suivant qu'ils s'appuient sur un sommet du réseau supérieur ou inférieur (points pleins ou évidés).

3. — La désignation d'un segment sera suivie éventuellement d'une parenthèse où seront indiqués les symboles des autres segments avec lesquels il forme des domaines focaux.

Pour les figures en perspective, les segments focaux sont représentés par des traits doubles (interrompus s'ils ne sont pas vus directement).

On notera aussi que tout segment horizontal est associé à trois autres segments : le côté conjugué et les deux segments verticaux s'appuyant sur les extrémités de ce dernier. Tout segment vertical est associé aux nsegments horizontaux qui limitent le polygone qui est centré sur lui. On vérifie que l'on couvre par l'ensemble de ces domaines tout l'espace occupé par les champs polygonaux et que les conditions de continuité sont bien satisfaites aux interfaces qui les séparent. Ces conventions sont appliquées sur la figure 22 à un système de réseaux conjugués non quadratiques. L'orientation des axes cholestériques entre les deux



FIG. 21. — Perspective des couches cholestériques dans un champ polygonal. a: trois couches superposées; b: double évasement d'une couche isolée; c: parcours  $\gamma$  d'une dislocationcoin (comparer avec la Fig. 3c); d: arrangement des molécules à un même niveau de la sratification cholestérique (absence de dislocations de rotation dans la partie gauche de la figure, présence à droite); e: la figure d vue en projection horizontale.

réseaux est également portée sur cette figure. Nous essaierons dans la mesure du possible de conserver ces notations dans l'ensemble des textures que nous étudierons par la suite.



FIG. 22. — Conventions adoptées pour désigner les segments focaux d'un système de champs polygonaux (cf. texte; figure réalisée d'après la micrographie de la Fig. 3c). Les petits clous en pointillés (sur la gauche de la figure) représentent les axes cholestériques à un niveau intermédiaire entre les deux réseaux. Les clous sont orientés selon la projection horizontale des axes (sur le plan de la figure), leur pointe correspondant au côté de l'axe dirigé vers l'observateur. Ces conventions reproduisent celles appliquées aux molécules. On comprendra ces orientations en se reportant aux figures 18 et 21.

orientations en se reportant aux ligures 18 et 21.

Certaines remarques confirment les observations sur les champs polygonaux et leur interprétation. La ressemblance de ces dispositions avec celles décrites par Friedel et Grandjean dans les smectiques suggère que les branches d'hyperbole constituant les côtés des polygones admettent chacune un segment d'ellipse conjugué. Cependant, aux n segments d'hyperbole limitant un polygone correspond un seul segment vertical, intersection des n plans de symétrie de chaque branche d'hyperbole. La ligne focale conjuguée est donc un segment de droite se substituant selon une bonne approximation aux n segments des ellipses conjuguées, tangentes entre elles, selon la verticale du centre du polygone (foyer commun des *n* branches d'hyperbole qui le limitent). Les polygones sont donc bien plans, tous leurs côtés étant perpendiculaires à ce même segment vertical. Tous les polygones sont coplanaires, sinon leurs côtés seraient nécessairement rectilignes. L'observation directe au microscope permet d'examiner au point simultanément tout le réseau du niveau lame ou tout le réseau du niveau lamelle. La verticalité des segments conjugués peut être également vérifiée. Les centres des spirales rondes ou polygonales superposées coïncident parfaitement en projection verticale. L'arrangement selon des réseaux de polygones conjugués nécessite la planéité des réseaux et la verticalité des segments conjugués dans l'épaisseur de la préparation. Nous avons vu plus haut que les séries de chevrons qui partagent ou entrouvrent un champ polygonal correspondent en général à un ruban formé de polygones allongés perpendiculairement à la direction de celui-ci.

d) CAS PARTICULIERS. — Certains côtés de polygone peuvent présenter des *bifurcations*; cet arrangement admet également une décomposition en domaines. Le nombre de ces derniers et leur disposition relative dans l'espace en font un arrangement assez compliqué. Nous remarquerons d'abord que l'on peut représenter la zone qui est associée à un couple de côtés conjugués par un petit prisme d'arête verticale dont la base a pour diagonales ces deux segments en projection. Nous avons simplifié la figure 23 en partant d'un réseau quadratique. Il est facile en reprenant les figures 17 et 18 d'établir la figure 23. Chacun de ces prismes est rempli par cinq domaines représentés séparément dans la partie droite de la figure.



FIG. 23. — Couple de côtés conjugués dans un réseau quadratique. a: prisme contenant l'ensemble des domaines qui leur sont associés; b: représentation symbolique sur le plan horizontal du couple de côtés conjugués; c: décomposition en cinq domaines.

Considérons maintenant deux couples de côtés conjugués (Fig. 24*a*) que nous supposons rectilignes, l'un étant porté par la médiatrice de l'autre. Les deux côtés 1' et 2' ont une extrémité commune a' caractérisée par un angle assez aigu. Leurs conjugués 1 et 2 forment un angle presque plat. Nous pouvons rencontrer une situation voisine où les deux segments 1' et 2' fusionnent suivant un segment 1' + 2' (cf. Fig. 4*a*, *b* et Fig. 24*b*).

Le schéma dans l'espace de la figure 24c correspond aux deux couples de côtés conjugués sans qu'aucun segment ne soit mis en commun. La décomposition en domaines s'obtiendra en appliquant à chaque couple de segment conjugué le modèle de la figure 23. Le prisme de la figure 24d correspond à un nouvel aménagement des structures à l'intérieur du prisme de la figure 24c, sans cependant ne rien changer à la topologie du champ polygonal à l'extérieur. Ayant réalisé une figure symétrique, il suffira de donner la décomposition de l'un des prismes losangiques seulement (et sur la Fig. 24e, c'est le prisme le plus inférieur en dessin dans la Fig. 24d, qui a été repré-



FIG. 24. — Représentation de deux couples de côtés conjugués formant un angle très aigu. a: les côtés 1' et 2' sont complètement séparés; b: ils admettent une partie commune 1' + 2' (situation réalisée dans la Fig. 4a, b); c et d: perspective cavalière de l'ensemble de la mésophase liée à ces couples de côtés conjugués dans les cas a et b; e: décomposition en domaines de la moitié inférieure de d.

senté). On obtient ainsi 7 domaines (soit 14 en tout) pour ce côté bifurqué.

Les figures 24a et c correspondent à des domaines focaux imparfaits. Mais, en projection, les extrémités de l'un des segments peuvent être considérées comme les foyers de l'autre. Il n'en est plus ainsi pour les figures 24b, d, e.

Nous avons admis en première approximation que les côtés des polygones étaient toujours des segments



FIG. 25.

d'hyperbole (parfois rectilignes) les extrémités de l'un étant à la verticale des foyers de l'autre. L'existence de ces bifurcations montre qu'il n'en est pas toujours exactement ainsi. Reprenons en effet la figure 24d, mais dans son cas le plus général. Si trois sommets de polygone sont donnés et presque alignés (l', m', n' dans la figure 25). Supposons données également les deux branches d'hyperbole qui portent les côtés 1 et 2 conjugués de 1' (d'extrémités l' m') et 2' (m' n'). Ces deux hyperboles sont supposées se couper en  $\alpha$ (au moins) par où passe une seule branche d'hyperbole de foyers l' et n'. Nous appellerons 1 + 2 cette branche. Considérons un point a qui limite 1 + 2; les deux segments d'hyperbole 1' et 2' doivent admettre le point a pour foyer. Or l'un des foyers de 1' étant sur 1, le second doit l'être aussi (c'est-à-dire a). Pour la même raison le point a est également sur 2. Il est donc nécessairement confondu avec  $\alpha$ . Ainsi, la bifurcation des côtés des polygones est incompatible avec leur



FIG. 26. — Fissure ou zone de dissociation dans un champ polygonal supposé quadratique. a : représentation conventionnelle du champ polygonal ; la fissure est soulignée par un grisé ; l'orientation des axes cholestériques est précisée dans le champ polygonal et dans la fissure ; b : perspective cavalière correspondant à la figure a ; les couches cholestériques sont figurées dans le plan de la lamelle, dans les plans verticaux P limitant le champ polygonal et dans un plan M mobile, parallèle à P. L'inclinaison des strates s'inverse au niveau des plans AA' CC', LL' MM', BB' CC'. Le cas analysé dans cette figure n'introduit pas de dislocation de rotation.

nature hyperbolique. En fait, la périodicité cholestérique admet suffisamment de défauts pour que ces bifurcations soient tout de même possibles (\*).

### La dissociation d'un champ polygonal en l'absence de chevrons peut être réalisée de deux manières.

1) Dans un premier cas, il n'y a pas de dislocation de rotation sur les bords de la fissure, même si les images en donnent l'apparence. Le champ polygonal est supposé quadratique sur la figure 26a, et la zone de dissociation est représentée en grisé. De part et d'autre de cette zone, les champs polygonaux sont décomposés en domaines. La disposition des couches cholestériques a été représentée en perspective au niveau des frontières P entre les champs polygonaux et cette zone médiane (Fig. 26b). Rien ne s'oppose topologiquement à la réunion des deux frontières en regard par des couches cholestériques subparallèles. L'intersection de celles-ci par un plan M mobile (parallèle aux bords de la fissure) donne une figure constante. Les strates sont inclinées selon des orientations inverses dans les rectangles al' cm' et l' bm' d respectivement (Fig. 26a, b). Les lignes le long des-



FIG. 27. — a: aspect présumé des couches cholestériques au voisinage d'une fissure dans un champ polygonal. P : plan séparateur vertical entre la fissure F et le champ polygonal;  $\rho$  : ligne focale comparable au segment LL' de la figure 26b, mais légèrement inclinée vers l'intérieur du champ polygone; b: arrangement des couches cholestériques au niveau de P. La figure 27 donne une représentation plus exacte des couches dans la disposition décrite sur la figure 26.

(\*) La figure 5b (dans sa partie supérieure, centre gauche) présente un côté qui bifurque (à l'instar de la Fig. 4a, 4), mais dans ce cas, le côté 1' + 2' admet un conjugué reliant  $n \ge l$ , les points a' et  $\alpha'$  n'étant alors plus nécessairement confondus. Cette figure particulière malgré sa bifurcation comporte des branches d'hyperbole parfaites.

quelles s'effectuent ces changements d'orientation sont fortement soulignées dans les préparations (Fig. 14c, flèche). On remarquera qu'un tel arrangement ne nécessite pas de dislocation de rotation, mais introduit un plan de discontinuité (LL' MM' sur la Fig. 26) et ne respecte pas la loi des cônes correspondants. En fait, un examen attentif des segments focaux, au niveau de la frontière F, montre qu'ils ne sont pas exactement verticaux dans ce type d'arrangement. Ils sont légèrement inclinés vers l'intérieur du champ polygonal et permeitent une disposition comparable à celle indiquée sur la figure 27.

2) Dans un deuxième cas, d'authentiques dislocations de rotation interviennent sur les bords de la fissure. Les strates y sont obliques et parallèles sans renversement de leur orientation (Fig. 28). Le pas cholestérique présente de fortes variations et ceci permet aux strates de ne pas couper coniquement les segments focaux subverticaux, mais de s'y enrouler cylindriquement. Le détail des arrangements est indiqué sur la figure 28.

Les deux types d'arrangements décrits sur les figures 26 à 28 interviennent le plus souvent côte à côte

dans une même fissure. On ne peut plus appliquer à ces zones de dissociation les règles simples de décomposition en domaines que nous avons vues à propos des champs polygonaux. Il en sera de même pour les autres cas que nous allons étudier maintenant.

Certains polygones présentent un centre dédoublé selon deux dislocations de rotation (au moins en apparence) (Fig. 4 et 15). Cette situation correspond à l'absence d'un couple de côtés conjugués ainsi que le montrent les figures comparées 29a et b. Tout le champ polygonal de la figure 29a peut être décomposé en domaines, à l'exception du prisme à arête verticale, de base BEDF. Les arrangements cholestériques en regard sur les faces BEB' E' et BFB' F' de même que sur DED' E' et DFD' F' peuvent être reliés par des couches parallèles au segment EF (arrangement comparable à celui de la figure 26b). En fait, une telle disposition ne respecte pas la loi des cônes correspondants et introduit une surface de discontinuité (le rectangle EFE' F'). Comme dans le cas de la figure 26, les segments EE' et FF' ne sont pas exactement verticaux ; E' F' est légèrement plus long que EF. Des paires de dislocations de rotation  $+\pi$  interviennent



FIG. 28. — Fissure dans un champ polygonal quadratique, bordée par des dislocations de rotation  $+\pi$ ; *a*: représentation conventionnelle du champ polygonal avec orientation des axes cholestériques; les petites sinusoïdes indiquent les zones où s'inversent les axes cholestériques; *b*: disposition des couches cholestériques dans le proche voisinage de la fissure. Cet arrangement se prête à la formation de dislocations de rotation  $+\pi$ ; *c*: coupes sériées subverticales aux niveaux 1, 2, 3, indiqués dans la figure *a*, illustrant une zone d'inversion de l'orientation des axes cholestériques.



FIG. 29. — a: représentation conventionnelle d'un champ quadratique dont un polygone présente un centre dédoublé;
b: introduction d'un couple de côtés conjugués conduisant à un champ polygonal normal; c: perspective cavalière correspondant à la figure a. La décomposition en domaines focaux s'effectue dans l'ensemble du parallélépipède rectangle AA' BB' CC' DD', sauf le prisme d'arête verticale et de base BEDF, où l'arrangement cholestérique a été représenté.

également dans la morphologie de certains polygones à centre dédoublé. On a alors un arrangement comparable à ceux de la figure 28b.

Les quadrilatères de jonction entre deux polygones sont limités par quatre côtés qui ont tous une valeur focale. L'analyse de l'arrangement des couches dans leur proche voisinage nous a conduits à un schéma introduisant une dislocation de rotation. —  $\pi$ , formant un demi-cercle (Fig. 30). Il s'agit plus exactement



FIG. 30. — Disposition des couches cholestériques au niveau d'un quadrilatère de jonction ; une dislocation de rotation —  $\pi$  est nécessaire.

d'un arc d'hélice. Supposons, en effet, que la dislocation de rotation  $-\pi$  soit une  $\lambda$  (Fig. 31). Les molécules restent parallèles à la dislocation sur tout son trajet et il y a, entre ses deux extrémités, décalage d'un demipas cholestérique. Ce décalage observé sur les figures 3aet b dépend donc de la chiralité de la mésophase.



FIG. 31. — La dislocation de rotation peut être une disinclinaison légèrement hélicoïdale ; L : plan de la lame.

e) ORIGINE DES FIGURES SPIRALÉES. — Reprenons l'exemple des réseaux polygonaux, quadratiques, parfaits et examinons la disposition des strates le long d'un segment focal vertical. Cet arrangement est indiqué sur la figure 32 ; dans l'exemple choisi A se trouve au centre d'un polygone et A' occupe un sommet du réseau conjugué. Les spirales observées résultent de la section optique d'un tel système de couches cholestériques, généralement coniques de révolution, plus ou moins arrondies au sommet (mais pouvant s'approcher d'une forme pyramidale au voisinage des centres des polygones). La nature de



spirales et leur orientation ne sont pas modifiées par déformation de ces couches, si elles restent emboîtées et conservent la même concavité. La nature topologique de la question étudiée est identique à celle d'un cas de figure déjà élucidé dans un précédent travail où nous avons considéré les systèmes fibrillaires biologiques dont la géométrie est comparable à celle des mésophases cholestériques [5]. Des agencements spiralés comparables ont été observés par Robinson et coll. [6]. Si l'on étudie en section horizontale un ensemble de couches cholestériques emboîtées selon un dôme anticlinal d'axe vertical, on obtient un système de spirales doubles dont les orientations moléculaires sont portées sur la figure 33. Le sens d'enroulement de ces doubles spirales ne dépend que de l'arrangement dextre ou senestre du cholestérique et de l'évasement des couches emboîtées vers le haut ou le bas de la préparation. C'est même un moyen de déterminer la chiralité de la mésophase. On peut reconnaître ainsi pour le MBBA que le benzoate de cholestéryl induit une torsion senestre alors que le baume œuvre de manière dextre. Dans ce dernier cas, les spirales polygonales (côté lame) et rondes (côté lamelle) situées sur les mêmes segments verticaux et correspondant à des couches évasées vers le bas, donnent des spirales dextres (Fig. 5). Pour les autres segments verticaux (évasement vers le haut, spirales rondes côté lame, polygonales côté lamelle) les spirales sont senestres.

Ces spirales sont bien visibles en lumière naturelle en diaphragmant un peu. Le contraste de phase les révèle avec beaucoup de netteté, mais l'aspect des figures obtenues est très variable. Les caractéristiques des objectifs sont fixées par construction et ils ne permettent pas d'obtenir nécessairement le plus fort contraste pour les retards de phase les plus élevés. Les lignes sombres observées ne correspondent pas toujours au lieu des molécules horizontales. Lorsque les préparations sont assez épaisses, les spirales du côté lame ne sont pas toujours bien résolues, étant séparées de l'objectif par toute l'épaisseur de la mésophase.

L'analyse au microscope polarisant n'est pas toujours aisée, même au niveau de la lamelle ; il est difficile en effet de préciser la nature de la lumière incidente qui, polarisée au départ, a traversé toute l'épaisseur de la mésophase. Suivant les cas, on observe des doubles spirales, des courbes fermées concentriques ou des figures compliquées intermédiaires entre ces deux types. Pour comprendre l'origine des courbes concentriques fermées, nous prendrons d'abord un exemple simple au point de vue optique. Nous étudierons dans un prochain travail des préparations dont l'épaisseur est de l'ordre du demi-pas cholestérique ou inférieure ; on obtient dans certaines régions des spirales doubles en lumière naturelle ou en contraste de phase et l'étude de l'inclinaison de l'axe cholestérique montre que tout se passe comme si on examinait un champ polygonal en mettant au point entre la lame et le couvre-objet. Une telle préparation simule une mince lamelle horizontale qui aurait été prélevée dans un champ polygonal sans modifier la structure. On observe une double spirale bien nette, en diaphragmant ou par examen au contraste de phase, parce que se trouve visualisé le lieu des points où les molécules sont horizontales. On est dans le cas de la figure 33. Au microscope polarisant, entre nicols croisés, on déter-



FIG. 33. — Disposition des molécules dans une double spirale d'arceaux.

mine les zones où les projections horizontales des molécules sont parallèles ou perpendiculaires aux polariseur et analyseur. La figure 33 montre que l'on aura nécessairement une série d'anneaux concentriques ; le passage des doubles spirales aux anneaux concentriques quand on passe de l'examen en lumière naturelle à celui entre nicols croisés est très caractéristique de l'arrangement cholestérique.

Lorsque la préparation est épaisse, de l'ordre de plusieurs pas cholestériques, une coupe optique ne donnera pas nécessairement des anneaux concentriques mais plutôt des spirales, la complication des parcours lumineux nous conduisant statistiquement aux conditions d'examen en lumière naturelle. Il arrive souvent que de belles spirales doubles soient résolues entre nicols croisés au niveau lamelle, alors que l'on obtient des courbes concentriques fermées au niveau lame. Cet effet est encore difficile à expliquer.

Etudiées en lumière naturelle, certaines spirales ne sont pas d'ordre 2 mais d'ordre plus élevé (3, 4...)ou au contraire d'ordre 1 (spirale simple), 0 (anneaux concentriques) ou d'ordres -1, -2, etc... (Si ces spirales simples, doubles, etc... sont en sens inverse de l'orientation qui leur est normalement assignée d'après les règles énoncées plus haut.) Il est alors facile de montrer que le segment focal vertical qui détermine ces spirales en coupe optique comporte une dislocation-vis. Nous étudierons cette question générale dans un prochain travail. On peut déjà se reporter à une situation analogue étudiée dans des pseudomorphoses cholestériques (cf. Bouligand, 1969).

f) Réseaux imparfaits. — Nous avons examiné des champs polygonaux dont les côtés ne sont pas parfaitement définis (Fig. 15a, b). La stratification apparaît plus serrée du côté lamelle (par exemple) que du côté lame. L'inclinaison moyenne des strates par rapport à la verticale est plus élevée aux abords de la lame, mais le pas cholestérique ne paraît pas varier de manière sensible. Les conditions d'ancrage de la mésophase ne sont pas identiques entre les deux parois. Ces réseaux dissymétriques s'observent souvent entre les champs de polygones parfaits (couches cholestériques verticales au proche voisinage des lame et lamelle) et les « structures à plans » (couches subhorizontales). Puisque la stratification n'est pas exactement verticale au contact du verre, les décompositions en domaines ne sont pas valables. On obtient cependant une bonne représentation de l'arrangement en supposant que les segments focaux horizontaux ne sont plus au contact de la lame ou du couvre-objet, mais à l'extérieur des limites L et 1 de la mésophase (Fig. 34). La dissymétrie d'influence des deux parois horizontales entraîne parallèlement des distances différentes de ces segments focaux non matérialisés à la mésophase. Il peut arriver que l'influence des deux verres soit comparable. Il y a alors symétrie, mais les côtés des polygones sont assez flous. Nous ne savons pas quelle signification physique prêter à



FIG. 34. — L'arrangement dans certaines zones de la préparation est comparable à celui de la figure 19b, mais les segments focaux horizontaux 1, 2, 3', 4' ne sont pas situés au niveau des lame L et lamelle 1; ils paraissent extérieurs à la mésophase et ne sont pas matérialisés.

cette interprétation. Nous n'y voyons jusqu'à présent qu'un artifice géométrique commode. Ces champs polygonaux imparfaits peuvent être identifiés avec une mince lame horizontale que l'on aurait pu prélever, sans en modifier la structure, dans un réseau parfait. Nous avons déjà indiqué une situation analogue dans les paragraphes qui précèdent.

On observe certains réseaux dont les spirales diffèrent extrêmement peu de celles du réseau conjugué. On ne sait pas reconnaître quelles spirales sont de type « arrondi » ou au contraire « polygonal ». Il suffit pour cela que les points anguleux des strates deviennent de plus en plus arrondis au niveau où elles traversent les côtés des polygones. Les strates d'un réseau quadratique sont représentées sur la figure 35*a*. Les mêmes strates sont dessinées après avoir arrondi fortement les points anguleux (sur la Fig. 35*b*). Un tel réseau diffère très peu de son conjugué en projection horizontale.

Cet adoucissement des points anguleux résulte d'une faible épaisseur de la préparation. Dans les zones où deux côtés conjugués se croisent et où les points anguleux sont en principe les plus aigus, les strates sont subhorizontales comme l'indique la figure 36. Il leur est donc difficile, à moins d'une très forte courbure, d'être aussi verticales dans le proche voisinage des lame et lamelle. La striation, examinée dans ces zones de croisement des côtés conjugués, correspond à des sections (par les plans horizontaux de mise au point) de surfaces qui sont elles-mêmes presque horizontales. On comprend ainsi le grand rayon de courbure observé pour les couches au niveau où elles traversent les côtés des polygones.

g) COMPARAISON AVEC LES SMECTIQUES. — L'arrangement des mésophases cholestériques en domaines s'écarte encore plus que celui des smectiques de l'ordonnance rigoureuse selon des cyclides de Dupin. La règle d'appartenance d'un segment de courbe focale à un seul domaine à la fois, très souvent vérifiée



FIG. 36.

dans les smectiques, ne l'est plus du tout pour les cholestériques que nous avons étudiés. C'est même l'inverse qui se produit très généralement. Il y a mise en commun des segments focaux entre plusieurs domaines adjacents.

De même, les domaines présentant des surfaces réglées de contact au lieu de se toucher seulement au niveau de génératrices isolées. La loi de cônes correspondants a dû être modifiée. Il est nécessaire d'introduire des dislocations de translation et de rotation.

Les règles d'association en domaines des cyclides de Dupin sont souvent vérifiées avec une bonne précision dans les smectiques. En fait, nous avons déjà montré que la notion de domaine imparfait devait être introduite également puisque les polygones ne présentent qu'un nombre limité d'ellipses et que ces dernières y sont parfois absentes. Ces observations impliquent également la mise en commun de certains segments focaux et de surfaces réglées de contact entre les domaines dans de nombreux smectiques.

h) REMARQUES. — Nous observerons que dans l'ensemble des textures décrites, on enregistre de fortes variations de courbure et que les couches sont le plus souvent arrangées selon des surfaces à courbures opposées. Le pas cholestérique est pratiquement constant sauf au niveau des courbes focales le long desquelles il présente un maximum. Le pas cholestérique peut également présenter des variations au proche voisinage des dislocations de rotation. D'une manière générale, on constate que le « splay » et la torsion restent à peu près constants dans l'ensemble de la préparation, sauf au niveau des singularités. La flexion est beaucoup plus variable, mais passe également par un maximum au niveau des dislocations.

**Remerciements.** — Toute notre reconnaissance va à Monsieur le Professeur J. Friedel et au Docteur M. Kléman à qui nous devons de nombreux conseils et la lecture du manuscrit.

#### **Bibliographie**

- [1] BOULIGAND (Y.), J. Physique, 1972. BOULIGAND (Y.) et KLEMAN (M.), J. Physique, 1970, 31, 1041-1054.
- BOULIGAND (Y.) J. Physique, 1972, 33.
- [2] KLEMAN (M.) et FRIEDEL (J.), *ibid.*, 1969, 30, C 4-43.
  [3] FRIEDEL (G.), Ann. Physique, 1922, 18, 273. FRIEDEL (G.), C. R. Acad. Sci. Paris, 1923, 176, 475.
- [4] FRIEDEL (G.) et GRANDJEAN (F.), Bull. Soc. Fr. Min., 1910, 33, 40.
- [5] BOULIGAND (Y.), J. Physique, 1969, 30, C 4, 90-103.
- [6] ROBINSON (C.), WARD (J. C.) et BEEVERS (R. B.), Far. Soc. Disc., 1958, 25, 29-42.