

Regard scientifique sur la polarisation de la lumière

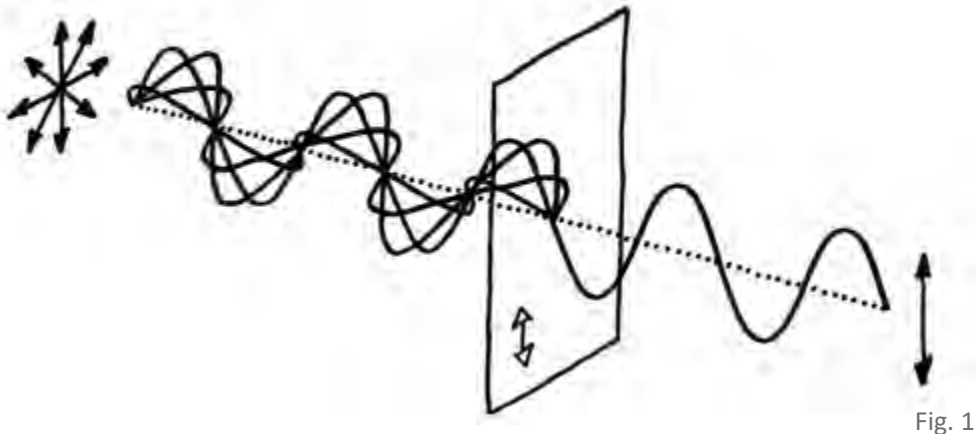
Par Julien Fade, Enseignant-chercheur à l'École Centrale de Marseille (Institut Fresnel- UMR 7249)

La polarisation, quèsaco ?

Comment représenter la lumière ? Vaste question qui taraude l'artiste, l'enseignant et le physicien... Un simple rayon lumineux se propageant en ligne droite fait souvent l'affaire, ce modèle paraissant relativement bien adapté à la conception « corpusculaire » de la lumière sous forme de grains élémentaires, les photons. On nous apprend par ailleurs que la lumière est aussi une *onde électromagnétique*, c'est-à-dire un couple de deux objets physiques appelés *champ électrique* et *champ magnétique* qui « vibrent », sans support, dans l'espace et dans le temps, et qui se propagent de proche en proche en ligne droite dans une direction donnée... Dans ce cas, on convient dans les livres de physique de représenter les ondulations du champ électrique \vec{E} , qui oscille comme une vague¹. Toutefois, une petite subtilité demeure, que nos yeux et nos caméras standard ne sont pas capables de distinguer : il existe plusieurs façons pour ce champ d'onduler dans l'espace et le temps... et c'est précisément cette trajectoire du champ que l'on appelle la *polarisation* de la lumière !

On la dit *linéaire* si le champ vibre toujours dans le même plan (à droite, sur le schéma de la Fig. 1), *circulaire* s'il décrit une spirale parfaitement hélicoïdale au cours de la propagation, ou *elliptique*, dans les cas intermédiaires. Le plus souvent la lumière naturelle (soleil, éclairage, etc.) n'est pas polarisée : les champs vibrent alors un peu dans toutes les directions (à gauche sur la Fig. 1), de façon désordonnée – ce qui explique pourquoi nos yeux ne se sont pas adaptés au cours de l'évolution pour être sensibles à cette propriété physique de la lumière.

Plusieurs mécanismes physiques permettent toutefois de « forcer » une onde dépolarisée à adopter une trajectoire fixe, polarisée, mais en pratique ce sont des films polarisants (polariseurs) qui sont le plus souvent employés pour cela (Fig. 1), comme par exemple dans les lunettes de protection solaires polarisantes (qui permettent d'éliminer les reflets polarisés sur la mer, ou la neige) ou en photographie (pour obtenir des ciels contrastés ou, là encore, filtrer les reflets sur l'eau).



N. B. Les notes de bas de page de ce chapitre renvoient vers les intitulés des œuvres de l'exposition faisant écho plus ou moins directement aux notions physiques ou mathématiques décrites ci-dessous.

¹À la surface des ondes, Point de divergence, Dual, Tu contemples ton âme, Dans la lumière

Cristaux de calcite et rayon extraordinaire

Historiquement, la théorie ondulatoire de la lumière, et plus particulièrement la découverte et l'étude du phénomène de *polarisation lumineuse*, sont nées de l'observation par le Danois Erasmus Bartholinus du phénomène de *double réfraction* dans des minéraux de Spath d'Islande (cristal de calcite²) au 17^e siècle. L'apparition d'une image dédoublée, provoquée par la propagation d'un *rayon extraordinaire* à travers ce matériau transparent, dit *anisotrope*, contredit en effet toutes les théories optiques de l'époque (Fig. 2). Comprendre ce phénomène a donné du fil à retordre aux physiciens, de Christian Huygens ou David Brewster à, entre autres, Augustin Fresnel. Cet ingénieur et physicien français a largement contribué à théoriser l'*optique ondulatoire*, et a laissé son nom à la fameuse *surface des ondes de Fresnel*³.

Cet « objet géométrique » mathématique, qui se déploie en trois dimensions comme une sorte de double coque (Fig. 2) laissant parfois penser à un « œil », n'est autre que l'ensemble des solutions de l'équation qui permet de calculer les deux *indices de réfraction* que peut rencontrer la lumière dans un matériau anisotrope. Ce phénomène est appelé *biréfringence* : double coque, double solution, double

indice de réfraction, et donc deux vitesses de propagation permises à la fois pour la lumière dans une même direction dans le matériau... Et par une sorte de schizogenèse de la lumière⁴, apparaissent alors deux ondes, donc deux rayons lumineux : l'un nommé *ordinaire*, l'autre étant avantageusement qualifié d'*extraordinaire*...

La compréhension théorique de ce phénomène est capitale pour comprendre (et exploiter à des fins d'applications) la façon dont la lumière polarisée interagit avec de tels matériaux. En effet, selon la direction de propagation choisie, les rayons *ordinaire* et *extraordinaire* peuvent se dédoubler, ou bien rester superposés, mais en se retardant l'un par rapport à l'autre d'une fraction de leur période d'oscillation, provoquant une modification de la polarisation de la lumière au cours de sa propagation. Au-delà de leurs innombrables applications technologiques, ces matériaux *biréfringents* sont une précieuse source d'inspiration esthétique, puisqu'en les plaçant entre deux films polarisants, ils donnent naissance à des couleurs interférentielles polarimétriques⁵ chatoyantes lorsqu'on les éclaire en lumière blanche.

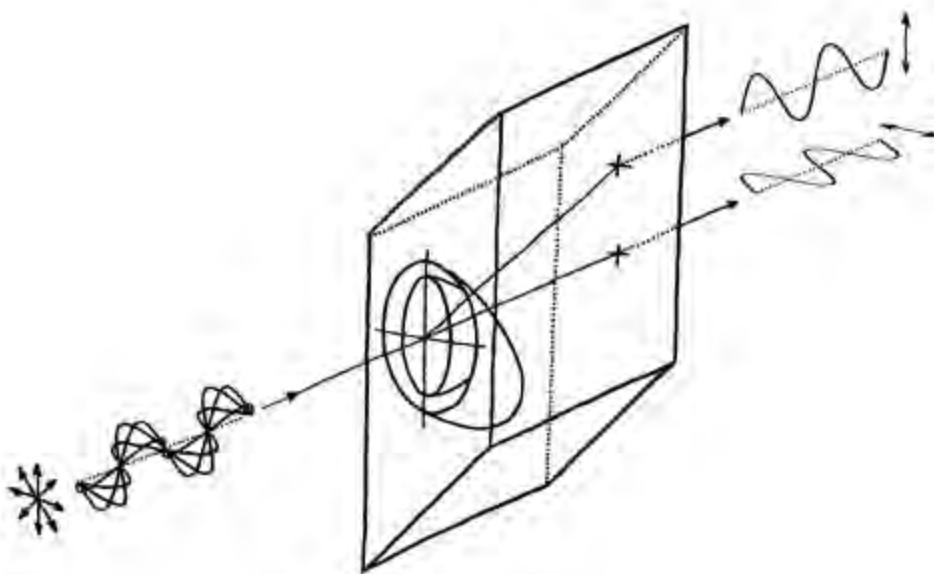


Fig. 2

² *Le rayon extraordinaire, Cette obscure clarté, À travers le cristal, Dans la lumière*

³ *L'œil était dans la pierre, La trahison des modèles, Surface des indices, Dans la lumière*

⁴ *Le rayon extraordinaire, Point de divergence, Dans la lumière*

⁵ *Le rayon extraordinaire, Dear Brewster*

Polarisation et écrans à cristaux liquides

Nous côtoyons les phénomènes optiques polarimétriques tous les jours sans le savoir : la technologie d'affichage LCD, qui équipe majoritairement les écrans innombrables de notre quotidien (montres digitales, téléviseurs, écrans de smartphones/tablettes/ordinateurs, affichages publicitaires, etc.), exploite en effet la polarisation lumineuse. Ces objets courants sont des bijoux de technologie et de miniaturisation où se mêlent électronique et optique pour transformer un signal informatique (électrique) en information visuelle (optique) intelligible à nos yeux. Pour réaliser cette prouesse consistant à moduler à volonté la transparence d'affichage, chacun des pixels de ces écrans intègre une couche fine (moins d'une moitié d'épaisseur d'un cheveu) d'un matériau transparent appelé *cristal liquide*⁶ (d'où la terminologie anglophone LCD pour Liquid Crystal Displays).

Ce matériau, ni tout à fait solide, ni tout à fait fluide, possède des propriétés singulières, telles que des *transitions de phase*⁷, qui ont fasciné des générations de physiciens. En appliquant une information sous forme électrique sur les électrodes transparentes qui enserrant cette fine couche de cristal liquide, on peut mettre en mouvement et orienter les molécules très allongées de ce matériau. On obtient dès lors une petite *cellule* de matériau *anisotrope*, dont la biréfringence peut être contrôlée directement par une tension électrique, et qui est donc capable de modifier à volonté la polarisation lumineuse localement en chaque pixel⁸! Le tour est presque joué, à condition de compléter le mille-feuille par une source de lumière uniforme (panneau de LED en général), que l'on polarise grâce à un premier film polarisant (verticalement sur la Fig. 3.). En y juxtaposant la dalle de cellules à

cristaux liquides et un second polariseur de direction croisée (horizontale ici), on obtient enfin une gradation de l'intensité lumineuse émise par chaque pixel, donc une image interprétable par nos yeux (Fig. 3).

Les nombreux dispositifs à double écrans LCD présentés dans l'exposition *Le rayon extraordinaire* utilisent ces afficheurs, en les modifiant à dessein pour obtenir une addition physique des signaux optiques informatifs composant les flux vidéos des écrans avant et arrière⁹. Dans l'espace vide qui les sépare, le savoir-faire des artistes compose grâce à cela des illusions mouvantes et subjectives de formes se déployant en profondeur au gré du mouvement du spectateur. Par ailleurs, les projecteurs¹⁰ – et même les casques de réalité virtuelle¹¹ – utilisés dans l'exposition intègrent la même technologie LCD, jouant encore une fois avec la polarisation pour offrir une vision 3D au spectateur. Pour cela, les images destinées à l'œil droit et gauche sont projetées alternativement à très haute cadence et sont filtrées sélectivement par les lunettes d'observation qui comportent là encore devant chaque œil une couche de cristal liquide dont la transparence est synchronisée avec le rythme d'émission des images.

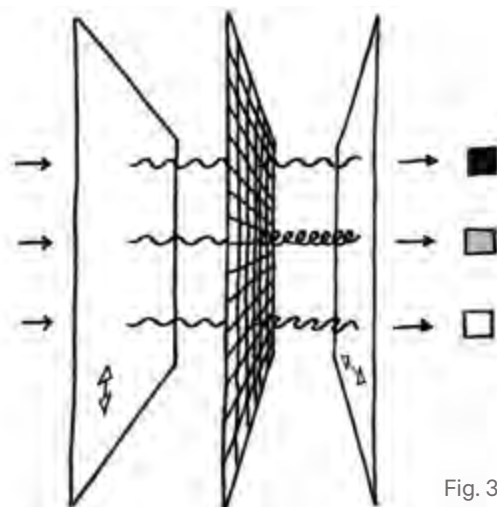


Fig. 3

⁶ Cristaux liquides

⁷ Cristaux liquides

⁸ *Dividers, Tu contemples ton âme, Cristaux liquides*

⁹ *À travers le cristal, À la surface des ondes, Surface des indices, Dual, Vision Cones, Les discrètes*

¹⁰ *Les clairvoyants, Les renversants*

¹¹ *Dans la lumière, Sous le ciel*

Polarisation et vivant

Le phénomène de polarisation de la lumière est omniprésent dans notre environnement naturel : dans le bleu du ciel, dans les ailes de certains papillons ou oiseaux, ou encore dans les reflets – par exemple sur des vitrages ou des surfaces d'eau. Il reste pourtant parfaitement invisible aux humains, contrairement à certains insectes (abeilles) et animaux marins (certains céphalopodes et poissons) qui ont développé une vision sensible à ces propriétés ondulatoires de la lumière. Si l'on sait que les abeilles exploitent les contrastes de polarisation du ciel pour s'orienter, l'utilisation de la polarisation par les seiches est encore plus fascinante : elles s'en serviraient pour distinguer une proie (ou un prédateur) de son image réfléchie à la surface de l'eau, le miroir d'eau ayant tendance à polariser la lumière qui le traverse ou qui s'y reflète.

Les recherches récentes sur l'éthologie de ces animaux fantastiques suggèrent une hypothèse encore plus incroyable : les seiches, championnes incontestées du camouflage et du mimétisme adaptatif sous-marin, pourraient avoir développé une communication intraespèce basée sur l'émission de motifs polarisés sur leur épiderme¹². Des cellules appelées *iridophores* seraient à l'origine de cette polarisation par réflexion sur certains organes de la seiche (le long des bras-tentacules) tandis que les cellules chromatiques de l'épiderme (chromatophores) ne posséderaient pas cette propriété. Ce sont précisément ces signatures polarisées, difficiles à observer, qui ont été captées et sublimes dans les pièces *Les discrètes* et *Le secret* de l'exposition (Fig. 4). Plusieurs autres œuvres présentées reposent sur le phénomène de polarisation de la lumière par réflexion, soit sur des surfaces minérales¹³, métalliques¹⁴ ou encore synthétiques¹⁵, soit sur des sujets de nature biologique¹⁶.



Fig. 4

¹² *Les discrètes, Le secret*

¹³ *Dividers*

¹⁴ *Le secret, Les clairvoyants, Les renversants*

¹⁵ *Tu contemples ton âme*

¹⁶ *Les clairvoyants, Les renversants*

Imagerie polarimétrique

Pour pallier notre incapacité à « voir » les propriétés de polarisation de la lumière, les scientifiques ont développé toute une panoplie de techniques d'imagerie polarimétrique permettant, avec des degrés très variables de complexité, d'accéder à certaines de ces propriétés. Puisqu'un détecteur d'images standard – numérique de nos jours – est insensible en lui-même à la polarisation, il faut nécessairement compléter l'instrument. Avec des architectures optiques optimisées, mais relativement simples, on peut révéler facilement des contrastes polarimétriques qui resteraient invisibles à l'œil nu ou sur la seule caméra, mais qui suffisent à traduire la façon dont les objets imagés perturbent la polarisation de la lumière incidente.

Jusqu'à récemment, ces architectures reposaient le plus souvent sur l'utilisation d'un cube de cristal anisotrope permettant de dupliquer l'image sur le capteur tout en l'« analysant » selon deux directions perpendiculaires de polarisation (Fig. 5). De nouvelles générations de caméras polarimétriques sont maintenant équipées de *micropolariseurs* métalliques, déposés sur les pixels du détecteur durant le processus de fabrication, rendant ainsi chaque pixel sensible à une direction de polarisation particulière... et rendant l'imagerie polarimétrique plus accessible que jamais ! C'est avec ce type de caméra que les motifs « secrets » de l'épiderme de la seiche présentés dans l'exposition¹⁷ ont pu être détectés (Fig. 4).

Une telle facilité de mise en œuvre est importante pour de nombreux domaines d'application : la vision industrielle (contrôle non-destructif ou tri automatique d'objets manufacturés, etc.), la défense (décamouflage, détection de cibles ou d'objets dangereux, etc.), les transports (aide à la vision à travers

l'atmosphère turbide), ou encore le diagnostic et l'imagerie biomédicale – bien que dans ce dernier domaine les architectures d'imagerie soient en général plus élaborées.

Malgré la simplicité de cette information de contraste, qui se limite à décrire si la lumière provenant de chaque point de la scène imagée est plus ou moins polarisée (paramètre appelé degré de polarisation), l'imagerie polarimétrique pose néanmoins la question de représenter, de donner à voir cette « dimension cachée » à l'utilisateur. Une des pistes de recherche de cette collaboration entre Art & Science a donc été d'expérimenter des moyens de perception « augmentée » de cette réalité physique qui nous échappe, par la couleur¹⁸, la pulsativité¹⁹ ou encore le déploiement tridimensionnel des images, utilisée dans plusieurs des œuvres de l'exposition²⁰ pour faire surgir des mondes fantasmagoriques...

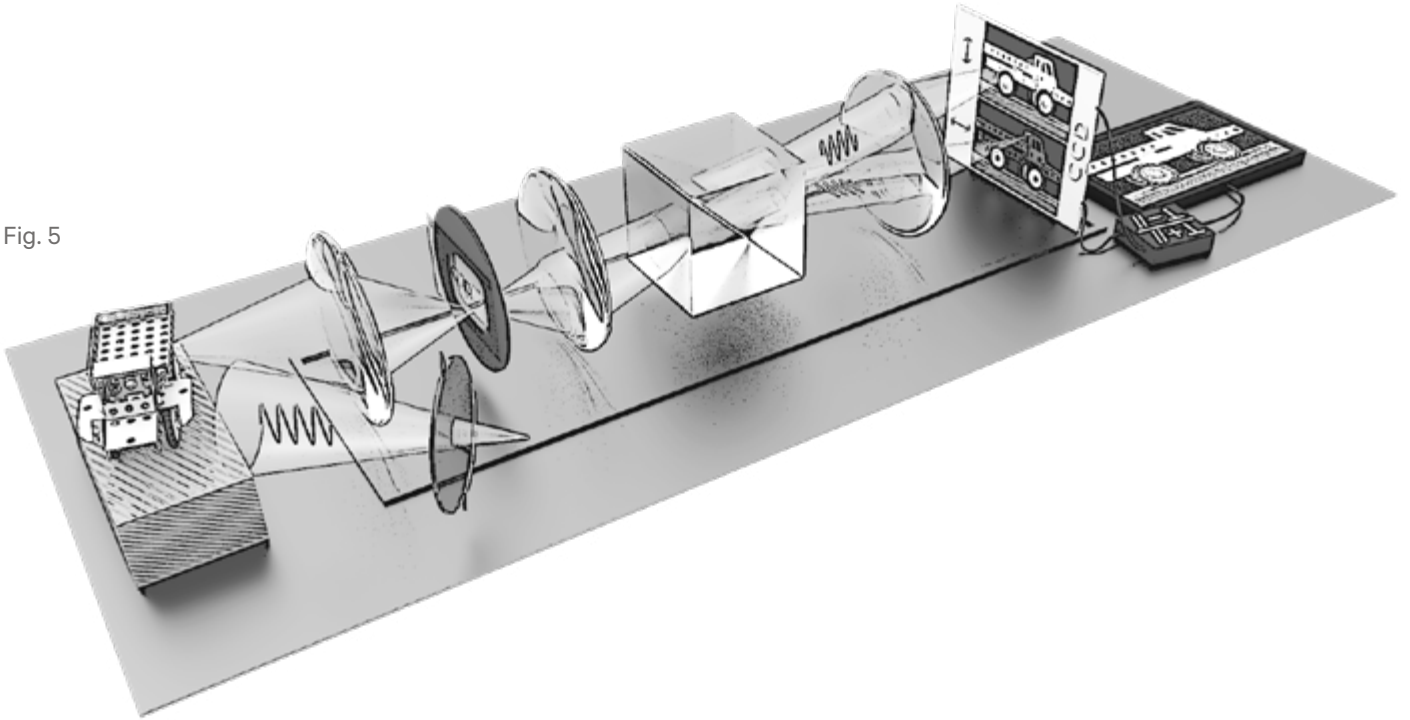
¹⁷ *Les discrètes, Le secret*

¹⁸ *Les discrètes*

¹⁹ *Le secret*

²⁰ *Élévation(s), Les clairvoyants, Les renversants, Les insulaires, Sous le ciel*

Fig. 5



Pour plus d'information, consulter l'article en ligne de Julien FADE, Matthieu BOFFETY et Vincent DEVLAMINCK, *L'imagerie polarimétrique*. *Photoniques*, n° 109, Juillet-Août 2021, p. 57 - 60 ou depuis le QR Code suivant :

