

Microfibres pour l'optique non-linéaire : historique

Aurélien Coillet



1 Optique

1.1 Le siècle des Lumières

L'étude scientifique moderne et mathématique de l'optique a débuté aux XVII^e et XVIII^e siècles, sous l'impulsion de scientifiques renommés pour leur contributions dans de nombreux domaines de la physique et des mathématiques :

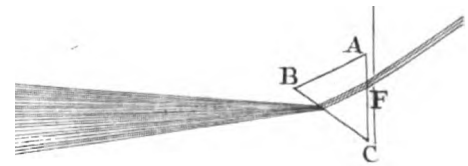
Galilée (1564-1642) Améliore et utilise les premières lunettes astronomiques.

René Descartes (1596-1650) Pose les bases de l'optique géométrique et de la théorie de la réfraction ¹

Pierre de Fermat (1607-1665) Propose un formalisme simple et puissant pour l'optique géométrique, grâce notamment à son principe : *La lumière se propage d'un point à un autre sur des trajectoires telles que la durée du parcours soit extrême* ².

Isaac Newton (1643-1727) Premier à avoir décomposé la lumière blanche avec un prisme, et propose une théorie des couleurs ³. On lui doit aussi la fabrication d'un télescope qui porte son nom.

L'optique a continué à évoluer par la suite, en affinant les outils de l'optique géométrique, mais il a fallu attendre le XIX^e siècle et James Clerk Maxwell pour faire un bon immense, avec l'apparition de la théorie de l'électromagnétisme et ses implications pour l'optique.



1.2 James Clerk Maxwell

Né en 1831 à Édimbourg et mort en 1879, James Clerk Maxwell est un mathématicien et physicien. Il est notamment connu pour sa théorie de l'électromagnétisme qui unifie l'électricité et le magnétisme.

Avant ses travaux, Michael Faraday et André-Marie Ampère notamment avaient produit de nombreuses études sur les sujets de l'électricité et du magnétisme, mais la théorie était complexe, les grandeurs mal définies. Maxwell réduisit le nombre de ces variables à 4, et établit les 4 équations qui portent son nom et constituent la base de l'électromagnétisme actuel ⁴ :

$$\operatorname{div} \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \qquad \operatorname{rot} \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \qquad (1)$$

$$\operatorname{div} \mathbf{B} = 0 \qquad \operatorname{rot} \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{j} + \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \qquad (2)$$

1. R. Descartes, *La dioptrique* (1637)

<http://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k56982285>

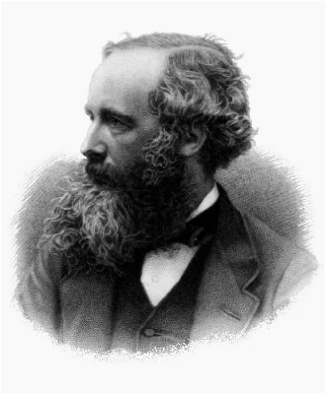
2. P. de Fermat, *Synthèse pour les réfractions* (1662)

3. I. Newton, *Opticks: Or, A Treatise of the Reflections, Refractions, Inflexions and Colours of Light* (1704)

<http://www.archive.org/details/opticksoratreatoonewtgoog>

4. J. C. Maxwell, "A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field," *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* 155, 459-512 (1865)

http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/19/A_Dynamical_Theory_of_the_Electromagnetic_Field.pdf



Ces équations relient le champ électrique \mathbf{E} et le champ magnétique \mathbf{B} à leurs sources, c'est à dire la charge ρ et le courant électrique \mathbf{j} .

Ces équations prévoient l'existence d'ondes associées aux oscillations du champ électromagnétique, et se propageant *étrangement* à une vitesse identique à celle de la lumière dans l'air :

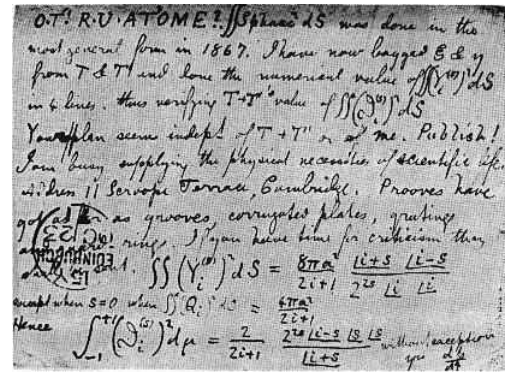
We can scarcely avoid the conclusion that light consists in the transverse undulations of the same medium which is the cause of electric and magnetic phenomena.

Cette identité entre les vitesses de propagation des ondes électromagnétiques et celle de la lumière est le premier indice laissant penser que la lumière est une onde électromagnétique.

Maxwell a donc créé la discipline de l'optique ondulatoire, qui étudiera et expliquera, dans les années suivantes, des phénomènes aussi variés que fascinants : la couleur grâce au concept de longueur d'onde, la diffraction, les interférences et les résonances, la biréfringence et le pouvoir rotatoire, ...

Par la suite, la théorie de l'électromagnétisme s'est adaptée, avec la découverte des théories de la mécanique quantique et de la relativité restreinte. On a notamment pu regrouper les 4 équations en une seule, unifiant en un seul terme tous les aspects électromagnétiques, et discrétiser les échanges d'énergie avec le flux lumineux, en faisant apparaître le *photon*. C'est également conjointement avec la mécanique quantique que l'optique ondulatoire permettra la prédiction puis la réalisation de l'effet LASER.

Cependant, la théorie de Maxwell reste valable dans la majorité des phénomènes d'optiques qui font l'objet de recherches aujourd'hui.



Lettre de Maxwell à Tait

1.3 Effet Kerr

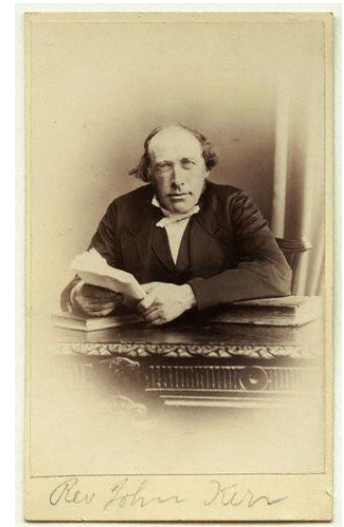
Parmi les différentes découvertes qui découlent de l'approche électromagnétique de l'optique, on trouve les différents effets non linéaires, et notamment, l'effet Kerr, du nom de John Kerr.

John Kerr est un physicien écossais, né en 1824 et mort en 1907, et il est connu pour avoir découvert l'effet d'un champ électrostatique sur la propagation de la lumière dans un liquide ou un solide. En particulier, il montre que l'indice de réfraction d'un milieu transparent (diélectrique) varie comme le carré de l'intensité du champ électrique ⁵ :

$$\Delta n = \lambda K |\mathbf{E}_0|^2 \quad (3)$$

Cette dernière équation a été généralisée, et le champ statique a été remplacé par n'importe quel champ applicable localement, y compris celui généré par l'onde optique : la lumière est donc à la fois la cause du changement d'indice, et voit sa propagation modifiée en conséquence de cette modification.

Ce phénomène est décrit très simplement, comme nous l'avons vu, mais ces conséquences sont nombreuses et complexes : génération de nouvelles longueurs d'ondes, biréfringence dépendant de la puissance, déphasages non-linéaires, bistabilité, ... C'est d'ailleurs souvent le cas avec les phénomènes non-linéaires, où la réponse d'un système n'est pas proportionnelle à l'excitation.



5. J. Kerr, *Philosophical Magazine* 1, 337 (1875)

2 Fibres et microfibres optiques

2.1 Les fibres optiques

Le principe des fibres optiques a été démontré par Daniel Colladon et Jacques Babinet au début des années 1840 à Paris. Ils décrivent le parcours des rayons lumineux dans un jet d'eau, et explique la conduction de la lumière par les réflexions totales subies par le faisceau à l'interface entre l'eau et l'air⁶. L'irlandais John Tyndall reproduisit l'expérience en 1854 lors de ses démonstrations à Londres. Ses explications et discussions sur la lumière et les propriétés réfractives de certains matériaux feront l'objet de 2 livres en 1870 et 1873^{7 8}.

Il faudra attendre les années 1920 pour voir apparaître l'utilisation de cylindres de verre guidant la lumière, avec leurs premières applications pour l'éclairage médical, particulièrement en chirurgie dentaire, et pour un prototype de télévision à fibres.

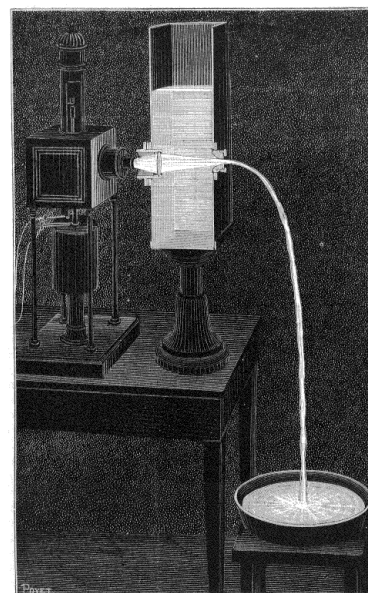
Les premières « vraies » fibres ainsi que les premières « vraies » applications arrivèrent en 1950, avec le développement des fibres à saut d'indice, et l'invention du fibroscope, système de transmission d'image utilisé en endoscopie et pour inspecter les soudures dans des réacteurs d'avion.

En 1960, le laser est inventé, et en 1964, Charles Kao propose l'utilisation conjointe du laser et des fibres optiques pour les télécommunications, idée pour laquelle il recevra le prix Nobel de physique en 2009. Il démontre que les pertes de signal dans les fibres optiques sont majoritairement dues aux impuretés, et peuvent donc être réduites pour permettre une transmission efficace sur de très longues distances et à très hauts débits⁹

Cette découverte va lancer la course pour l'amélioration des technologies de fabrication des verres et des fibres, l'invention des amplificateurs optiques, de multiples dispositifs de traitement du signal tout-optique, ... Toutes ces innovations ont permis l'émergence de réseaux de télécommunication performants, et notamment d'Internet.

2.2 Microfibres

De nombreux dispositifs fibrés sont fabriqués en étirant à chaud une fibre optique de télécom. Ce processus, poussé à l'extrême, permet de former des *taper*, c'est à dire des fibres dont le diamètre diminue plus ou moins rapidement jusqu'à des valeurs inférieures au micron. C'est ainsi que sont apparues les premières microfibres employées pour leurs propriétés optiques, dans les années 1980. Dans le but d'étudier facilement les non-linéarités optiques, on cherche à utiliser de nouveaux verres, tels que les verres de tellure ou de chalcogénure, pour lesquels il n'existe pas de fibre, ni de dispositif commercial d'étirage. Il a donc fallu redécouvrir des méthodes d'étirage différentes, telles que celles décrites par C.V. Boys en 1887¹⁰, référence précieuse, encore aujourd'hui.



Expérience de la fontaine Colladon.

6. D. Colladon, « Sur les réflexions d'un rayon de lumière à l'intérieur d'une veine liquide parabolique » *Comptes Rendus* 15, 800 (Juillet-Décembre 1842)

<http://www-lp1.univ-paris13.fr:8090/Images/fontaine/ColladonCRAS1842.pdf>

7. J. Tyndall, "Total reflexion," *Notes of a course of nine lectures on light* (1870)

<http://www.archive.org/details/notesacourseninootyndgoog>

8. J. Tyndall, *Six lectures on light* (1873)

<http://www.archive.org/details/sixlecturesonli05tyndgoo>

9. K.C. Kao and G.A. Hockham, "Dielectric-Fibre Surface Waveguides for optical frequencies" *Proc. IEE*, 113, 1151 (1966)

10. C.V. Boys, "On the production, properties, and some suggested uses of the finest threads," *Philosophical Magazine* 23, 489-499 (1887)

3 Sir Charles Vernon Boys

3.1 Biographie

Charles V. Boys a étudié la physique à la *Royal School of Mines*, sous l'impulsion de Frederick Guthrie, ses spécialités étant l'exploitation minière et la métallurgie. Il a également appris les mathématiques par lui-même, dans les livres.

Boys est connu pour être un grand scientifique et l'inventeur de nombreux instruments. Alors qu'il était encore étudiant, il inventa l'*integraph*, une machine qui dessine l'intégrale d'une fonction. Il accepta ensuite le poste de démonstrateur de physique dans cette même université, et commença alors réellement sa carrière académique.

Ces centres d'intérêts étaient particulièrement variés, et ses contributions portèrent notamment sur la photographie d'événements rapides et les bulles de savons, son livre *Soap bubbles, their colours, and the forces which mould them* étant un classique de cette science.

Charles Vernon Boys travailla ensuite en tant qu'expert pour une compagnie de gaz, et améliora les connaissances de l'époque sur le pouvoir calorifique de la combustion de ces gazs. Ces travaux ont permis leur facturation non plus au volume, mais à l'énergie thermique qu'ils étaient capables de restituer.

À sa mort, le monde scientifique et la société entière lui rendirent hommage, comme en témoigne la manchette extraite du *Times* reproduite ci-contre.

3.2 Microfibres de quartz fondu

Son invention la plus célèbre est celle portant sur les microfibres de quartz, appelées à l'époque *fused quartz finest threads*. Ses expériences portant sur la fabrication de ces microfibres de différents matériaux, ainsi que leurs applications potentielles sont décrites dans un article paru dans *Philosophical Magazine*¹¹.

Sa méthode de fabrication, reprise plus en détails par le recueil *On laboratory arts*¹², consiste à chauffer un petit cylindre de verre à la flamme, à en fixer une extrémité, et attacher l'autre sur une flèche :

A fragment of drawn-out glass was attached to the tail of the arrow by sealing-wax and heated to the highest possible temperature in the middle, the end being held in the fingers.

La flèche est ensuite catapultée par un arc ou une arbalète, étirant le cylindre de verre sur environ 30 m (!) :

With every successful shot, the thread was continuous from the piece held in the hand to the arrow 90 feet off.

Le poids de la flèche, l'essence de bois utilisée pour l'arc, la manière de fixer le verre, les différentes sortes de verres utilisés (saphir, rubis, zircon, rutilé, ...), ... tous ces paramètres sont ensuite étudiés de manière empirique (et approximative), et comparés afin d'obtenir les fibres les plus fines.

SIR CHARLES BOYS, F.R.S.

EXPERIMENTAL SKILL IN PHYSICS

Sir Charles Vernon Boys, LL.D., F.R.S., who died at St. Mary Bourne, Andover, yesterday, was a physicist distinguished for his experimental skill and his ability in the construction of delicate yet accurate measuring instruments.

Born at Wing, Rutland, on March 15, 1855, he was educated at Marlborough, and in the dedication of his book on "Soap Bubbles" he expressed his obligations to Mr. G. F. Rodwell, the first science master appointed at the school. From 1873 to 1876 he studied at the Royal School of Mines, South Kensington, and in 1881 he became a demonstrator at the Royal College of Science, where from 1889 he was assistant professor of physics. He was appointed one of the "Metropolitan Gas Referees" in 1897.

Boys was well known for his work on quartz fibres, discovering how to draw them in practically any degree of fineness and utilizing their torsion for the measurement of extremely small forces. One application he made of such fibres was to the suspension of the moving system of his radiomicrometer for the measurement of radiant heat, an instrument so sensitive that, aided by a reflecting telescope to bring the heat to a focus, it could detect the differences in the radiation from different parts of the moon's disc and would respond to the heat from a candle at a distance of more than a mile, though it gave no indications when the telescope was directed even to the brightest stars. He also made use of quartz fibres in his repetition of Cavendish's famous experiment for the determination of the gravitational constant. Here the torsion rod consisted of a little mirror suspended by a quartz fibre, and from the sides of the mirror, the movement of which was reflected upon a distant scale, were hung by fibres of the same material the small gold balls the attraction of which by large lead spheres was to be measured. His determination ranks as one of the best ever made.

Another subject to which he devoted a great deal of attention was the photography of lightning flashes and of rapidly moving objects, such as bullets, and soap films provided him with a study in which his powers of delicate manipulation found full scope, his book on "Soap Bubbles, Their Colours, and the Forces which mould them," being a classic in its way. A calorimeter which he described to the Royal Society in 1905 was adopted as the standard instrument for testing London gas after the passing of the London Gas Act in 1906, and when the Gas Regulation Act of 1920 introduced the method of charging for town's gas according to the amount of heat it will produce when burnt, he devoted himself to the construction of another ingenious form of apparatus which gives a continuous record of the heating value of the gas.

An early member of the Physical Society, from which he received the Duddell Medal in 1925, he served it successively as secretary and president. He was elected a Fellow of the Royal Society in 1888, and was awarded a Royal medal in 1896 and the Rumford Medal in 1924, while he was awarded the Elliott Cresson Medal of the Franklin Institute of Philadelphia in 1939. In 1903 he was president of Section A, Mathematics and Physics, of the British Association at its Southport meeting. He received a knighthood in 1935. In addition to writing the book on "Soap Bubbles" already mentioned, and many scientific papers, he edited and completed a volume on dynamometers by the late Rev. F. J. Jervis-Smith. Early in 1939 he published a second edition of a little book on the eradication of garden weeds.

He married in 1892 Marion Amelia, daughter of Henry Pollock. The marriage was dissolved in 1910. His son, Mr. Geoffrey Vernon Boys, was appointed secretary of the Institution of Naval Architects in 1936.

11. C.V. Boys, "On the production, properties, and some suggested uses of the finest threads," *Philosophical Magazine* 23, 489-499 (1887)

12. R. Threlfall, *On laboratory arts*, Macmillan and Co., London (1898)
<http://www.archive.org/details/cu31924014824886>

Les microfibrilles formées ont un diamètre extrêmement faible :

I have obtained threads of quartz which are so fine that I believe them to be beyond the power of resolution of any possible microscope. [...] marks corresponding according to the eyepiece to $\frac{1}{100000}$ inch, yet these threads are hopelessly beyond the power of the microscope to define at all.

Un *inch* équivalent à 25 mm, les microfibrilles fabriquées auraient un diamètre inférieur à 250 nm (!!!) si les estimations de Boys sont correctes. Ces dimensions sont effectivement inaccessibles à n'importe quel microscope optique (même actuel), et sont celles que l'on obtient encore aujourd'hui en laboratoire.



Boys et les bulles de savon

Boys décrit brièvement les particularités de ces fibres tellement fines que les processus physiques s'y appliquant semblent différents de ceux qui nous entourent :

The thread may be traced on and on round the most marvellous convolutions, the diffraction-fringe now alone appearing at all, but getting fainter and apparently narrower until the end is reached. That a real thing is being looked at is evident, for if the visible end is drawn away, the convolutions of fringes travel away in the same direction. [...] The most obvious property of these fibres is the production of all colours of the spider-line when seen in a brilliant light. The most magnificent effect of this sort I have seen, was produced by a thread of almandine. One of these the length of the room, even though illuminated with gas-light only was glistening with every colour of the rainbow.

Ici, Boys montre l'extrême souplesse de ces fibres, leur aptitude à diffracter la lumière, et à produire des interférences même en lumière blanche, ces irisations connues sous le nom de teintes de Newton. Ces observations confirment que les diamètres des fibres sont de l'ordre de la longueur d'onde de la lumière visible, donc en dessous de 1 μm .

Dans la suite de l'article, les propriétés mécaniques de ces fibres sont étudiées, et elles apparaissent comme les fils de torsion les plus parfaits, et dont le moment de torsion est le plus faible :

The tail-ends of those that become invisible must have a moment torsion 100 million times less than ordinary spun glass.

Les propriétés élastiques de ces fibres sont remarquables : Boys fabrique un ressort avec une microfibrille refondue (pour qu'il garde sa forme), et l'estime capable de mesurer une différence de poids de 10 millièmes de grammes.

Cette étude, incomplète de l'aveu même de l'auteur, servira de base pour d'autres études sur ces microfibrilles, mais seul l'aspect mécanique sera retenu. C'est d'ailleurs leur élasticité parfaite qui servira dans une expérience inspirée de l'expérience de Cavendish qui permit de mesurer pour la première fois la constante universelle de gravitation. Les microfibrilles de Boys permirent d'améliorer considérablement la précision de cette mesure.

Les propriétés élastiques des fibres permirent également à Boys de concevoir un radiomètre¹³ capable de bouger sous l'influence d'une bougie à plus d'un *mile* (1.6 km) de distance, ou sous l'influence de la lumière de la lune.

13. Le radiomètre de Crookes consiste en une ampoule partiellement vidée d'air, dans laquelle on a disposé un système rotatif constitué d'un axe de métal sur lequel peut tourner un ensemble de quatre palettes de mica dont chacune a une des faces noircie au noir de fumée et l'autre argentée. Exposées à la lumière, ces palettes se mettent à tourner d'autant plus vite que la lumière est forte.